



**You have downloaded a document from
RE-BUS
repository of the University of Silesia in Katowice**

Title: Gemmologia ogólna

Author: Włodzimierz Łapot

Citation style: Łapot Włodzimierz. (1999). Gemmologia ogólna. Katowice :
Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego



Uznanie autorstwa - Użycie niekomercyjne - Bez utworów zależnych Polska - Licencja
ta zezwala na rozpowszechnianie, przedstawianie i wykonywanie utworu jedynie w celach
niekomercyjnych oraz pod warunkiem zachowania go w oryginalnej postaci
(nie tworzenia utworów zależnych).



UNIwersYTET ŚLĄSKI
W KATOWICACH



Biblioteka
Uniwersytetu Śląskiego



Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego

Włodzimierz Łapot

GEMMOLOGIA OGÓLNA

W.
GIA

15

ictwo
ytetu
ego
rice
9



Skrypty Uniwersytetu Śląskiego nr 552

Włodzimierz Łapot

GEMMOLOGIA OGÓLNA



**Wydawnictwo
Uniwersytetu
Śląskiego
Katowice
1999**

REDAKTOR SERII: NAUKI O ZIEMI
ANDRZEJ T. JANKOWSKI

RECENZENCI
ANDRZEJ KOSTRZEWSKI
WITOLD ŻABIŃSKI



Powstanie tego podręcznika było możliwe dzięki wsparciu **Foundation for the Development of the Education System**, która pokryła koszty stażu autora w **Laboratoire de Gemmologie, Université de Nantes**, kierowanym przez Profesora **Bernarda Lasniera**, oraz w **Laboratoire de Physique Cristalline** (Profesor **Emmanuel Fritsch**), **Institut des Materiaux de Nantes** we Francji.

Spis treści

<i>Od autora</i>	7
1. Wstęp	9
2. Podstawowe pojęcia krystalograficzne	14
2.1. Elementy symetrii kryształów	15
2.2. Układy krystalograficzne	16
2.3. Morfologia kryształów	24
2.3.1. Postać krystalograficzna	25
2.3.2. Prawo stałości kątów	29
2.3.3. Wskaźniki ścian. Prawo wymiernych stosunków (wskaźników)	31
2.3.4. Prawo pasowe	31
2.3.5. Pokrój kryształów (habitus)	32
3. Właściwości materiałów gemmologicznych (podstawowe metody identyfikacji)	36
3.1. Gęstość właściwa	37
3.1.1. Pomiar gęstości właściwej	40
3.2. Twardość	45
3.2.1. Skale twardości używane w gemmologii	45
3.2.2. Gemmologiczne testy twardości	47
3.2.3. Twardość jako cecha anizotropowa kryształu	47
3.3. Łupliwość i przełam	50
3.4. Własności optyczne	53
3.4.1. Środki obserwacji	53
3.4.1.1. Lupa	53
3.4.1.2. Binokulary	64
3.4.2. Odbicie i załamanie światła	68
3.4.2.1. Refraktometr	90
3.4.2.2. Mikrorefleksometr	101
3.4.2.3. Ciecze imersyjne	103
3.4.2.3.1. Imersjoskop	106
3.4.3. Polaryzacja światła	107
3.4.3.1. Polaryskop	110

3.4.3.2.	Konoskop	115
3.4.3.3.	Mikroskop polaryzacyjny	117
3.4.4.	Barwa	118
3.4.4.1.	Barwy absorpcyjne	120
3.4.4.1.1.	Widma optyczne (spektroskop)	129
3.4.4.2.	Specjalne efekty optyczne	146
3.4.4.3.	Ocena barwy	151
3.4.4.3.1.	Porównywanie barw (gemmologiczne komparatory barw)	151
3.4.5.	Pleochroizm	155
3.4.5.1.	Dychroskop	161
3.4.6.	Luminescencja	163
3.4.6.1.	Filtry — testery fluorescencji	167
3.4.6.2.	Lampy rtęciowe (kwarcowe, ultrafioletowe)	169
3.4.7.	Przewodzenie światła	174
3.4.7.1.	Perłoskop (neoendoskop)	176
3.5.	Inne własności materiałów gemmologicznych	178
3.5.1.	Przewodnictwo cieplne	179
3.5.1.1.	Testery przewodnictwa cieplnego (termolizery)	180
3.5.2.	Zwilżalność (adhezja)	182
3.5.2.1.	Testery zwilżalności	183
3.5.3.	Właściwości elektryczne	185
3.5.4.	Magnetyzm	187
4.	Wnętrze materiałów gemmologicznych	188
4.1.	Inkluzje	190
4.2.	Zrosty	195
4.3.	Niejednorodność składu (zonalność)	197
4.4.	Materiały polikrystaliczne i amorficzne	201
5.	Syntetyczne materiały gemmologiczne	202
5.1.	Metody otrzymywania monokryształów	203
5.2.	Produkty i producenci	210
5.2.1.	Syntetyczne monokryształy	210
5.2.2.	Syntetyczne materiały polikrystaliczne	221
5.2.3.	Syntetyczne materiały amorficzne	222
6.	Metody traktowania (poprawiania) materiałów gemmologicznych	224
6.1.	Obróbka termiczna	225
6.2.	Obróbka napromieniowaniem	228
6.2.1.	Pomiar radioaktywności (licznik Geigera)	231
6.3.	Obróbka chemiczna	233
6.4.	Obróbka powierzchniowa i przypowierzchniowa	234
7.	Szlify	239
7.1.	Szlify standardowe	239
7.1.1.	Szlif kaboszonowy	240
7.1.2.	Szlif fasetkowy (fasetowy)	242
7.2.	Szlify fantazyjne	252
7.3.	Ocena szlifów	255
7.3.1.	Proporcjoskop	257

9. Laboratorium gemmologiczne	266
9.1. Gromadzenie danych gemmologicznych	268
9.1.1. Karty danych	269
9.1.2. Banki danych	273
9.2. Klasyfikacja laboratoriów gemmologicznych	275
9.2.1. Laboratorium walizkowe (przenośne)	277
10. Literatura	281
Appendix: Towarzystwa i instytuty gemmologiczne	284
Résumé	286

**Les cristaux croissent,
les végétaux croissent et vivent,
les animaux croissent, vivent et sentent,
les gens croissent, vivent, sentent et pensent**

*Carl von Linné: Systema naturae, 1788—1793
(modification Włodzimierz Łapot)*

*Kryształy rosną,
rośliny rosną i żyją,
zwierzęta rosną, żyją i czują,
ludzie rosną, żyją, czują i myślą*

*Karol Linneusz: Systema naturae, 1788—1793
(modyfikacja Włodzimierza Łapota)*

Od autora

Szybki rozwój polskiego rynku kamieni jubilerskich wymusza zapotrzebowanie na wysoko kwalifikowaną kadrę rzeczoznawców i ekspertów. Dalszy zrównoważony rozwój tego rynku nie będzie możliwy bez zapewnienia wiarygodnej i fachowej oceny materiałów gemmologicznych znajdujących się w obrocie handlowym. Wobec obecnego poziomu rozwoju inżynierii materiałowej eksperzytę gemmologiczną odpowiadającą wymogom wymiany międzynarodowej zapewnić mogą tylko wyspecjalizowane, odpowiednio wyposażone, laboratoria gemmologiczne dysponujące właściwie wyszkolonym personelem.

Kształcenie ekspertów gemmologów na najwyższym poziomie, odpowiadające standardem krajom przodującym w tej dziedzinie (Stany Zjednoczone, Wielka Brytania, Francja, Niemcy, Japonia), dopiero się w Polsce rozpoczyna. Nieliczni eksperci gemmologów działający na polskim rynku materiałów gemmologicznych zdobyli swoje wykształcenie w różny sposób, przeważnie potwierdzając je odpowiednim tytułem i dyplomem renomowanego ośrodka zagranicznego. Nieuchronny rozkwit wymiany międzynarodowej, a w tych ramach także rynku materiałów gemmologicznych, nakazuje powiększenie tej grupy osób. Zupełnie naturalnym źródłem kadry rzeczoznawców i ekspertów gemmologicznych mogą być absolwenci studiów geologicznych o specjalności mineralogiczno-petrograficznej. Dysponują oni przygotowaniem, które jest dobrą podstawą dla uformowania przyszłego znawcy materiałów gemmologicznych.

W Uniwersytecie Śląskim, wzorem niektórych polskich i zagranicznych szkół wyższych, wprowadzono wykład z gemmologii do najnowszego programu studiów geologicznych. Inicjatywa ta jest wyjściem naprzeciw oczekiwaniom i ukazuje słuchaczom studiów geologicznych specjalizującym się w mineralogii i petrografii jeszcze jedną możliwość wyboru kierunku dalszego rozwoju.

Przygotowaniom niniejszej publikacji przyświecał zamiar zwięzłego przedstawienia zagadnień prezentowanych studentom ostatniego roku studiów geologicznych Uniwersytetu Śląskiego w ramach monograficznego wykładu

z „Gemmologii”. Jednak książka ta może być przydatna również wszystkim miłośnikom minerałów, a zwłaszcza osobom stykającym się amatorsko lub profesjonalnie z materiałami gemmologicznymi. Z tą myślą opracowano rozdział wprowadzający podstawowe pojęcia krystalograficzne oraz potraktowano nieco szerzej niektóre zagadnienia z dziedziny krystalooptyki.

Autor nie sądzi, żeby udało mu się znaleźć najlepszy z możliwych sposobów przedstawienia omawianych zagadnień. Dlatego będzie bardzo wdzięczny za wszelkie merytoryczne uwagi zmierzające do ulepszenia jego pracy.

1. Wstęp

Od niepamiętnych czasów kamienie szlachetne przyciągały uwagę człowieka. Szybko też stały się symbolem władzy i bogactwa. Ich posiadanie często było przywilejem panującego rodu lub stanowiło oznakę szlacheckiego pochodzenia (np. torkwes w Persji).

Już w starożytności ceniono w kamieniach szlachetnych takie ich właściwości, jak barwa, blask, przezroczystość, trwałość, niezmienność.

Niezwykle piękno i rzadkość występowania czyniły z nich przedmiot pożądania. Niepohamowana chęć posiadania prowadziła nieraz do zbrodni, toteż kamienie szlachetne bywały niekiedy uznawane za dzieło szatańskie.

Kamienie szlachetne służyły również ozdobie. W świecie grecko-rzymskim szczególnie ceniono diamenty, perły i szmaragdy. Na pierwszym miejscu stawiano diamenty, choć pod tą nazwą krył się często również korund. Drugie miejsce zajmowały perły, które ceniono bardziej w świecie rzymskim niż greckim. Zachwycano się zwłaszcza dużymi, całkowicie białymi i doskonale kulistymi okazami, które nazywano *exaluminatae*. Na trzecim miejscu stawiano szmaragdy, choć pod tą nazwą kryły się również inne przezryste minerały o zielonej barwie. Ze względu na barwę najwyższemu ceniono kamienie czerwone (korund — rubin, granat, chalcedon — karneol). Chętnie zestawiano je z kamieniami zielonymi (beryl — szmaragd, chalcedon — chryzopraz, malachit). W mniejszym stopniu korzystano z kamieni niebieskich (korund — szafir, lazuryt), żółtych (topaz, oliwin — chryzolit) i fioletowych (kwarc — ametyst). Posługiwano się też materiałami względnie tanimi (np. koral, szkło, gągat, fajans, bursztyn).

Zainteresowanie poszczególnymi kamieniami szlachetnymi zmieniało się na przestrzeni dziejów i często uzależnione było od aktualnej mody lub wierzeń.

Wydaje się, że najdawniejszą formą użytkowania kamieni szlachetnych był naszyjnik, początkowo traktowany jak symbol władzy. Później kamienie szlachetne stały się składnikami różnych elementów uroczystego stroju (np.

diadem, korony, berła, miecza, tarczy, pierścieni, bransolet) i wyposażenia (np. rydwanów, baldachimów, zastawy stołowej).

By uwydatnić walory estetyczne kamieni szlachetnych, już w starożytności zaczęto je szlifować i polerować. Powszechnie stosowano także technikę rzeźbienia (*gliptyka*). W średniowiecznej Europie przez całe wieki zadowalano się mniej lub bardziej zaokrągloną formą kamieni szlachetnych zwaną kaboszo-
nem. Obróbka polegająca na nadawaniu kamieniom szlachetnym wielościennych form geometrycznych pojawiła się dopiero około XIV—XV wieku.

Piękno i różnorodność kamieni szlachetnych można porównać tylko z kwiatami. Jako surowiec jubilerski wykorzystywanych jest współcześnie około 200 minerałów. Za najcenniejsze okazy uznaje się jednorodne, duże, naturalne monokryształy o doskonałej przejrzystości i wysokiej twardości, bezbarwne lub efektownie zabarwione, o silnym połysku, pięknej grze barw, dobrze przyjmujące poler. Podobnie było w przeszłości. W naturze takie okazy są niezwykle rzadkie, toteż nie dziwi wysokość cen, jakie uzyskują one na aukcjach. Jednocześnie zachęca to wielu do produkcji imitacji, których najdoskonalszą formą są niektóre syntetyczne monokryształy. Stale rosnąca produkcja wysokiej jakości materiałów syntetycznych nie zmniejszyła jednak popytu na materiały naturalne, a szczególnie na ich unikatowe egzemplarze. Są one dzisiaj wyżej cenione niż kiedykolwiek. Stosowanym od wieków sposobem waloryzacji materiałów gemmologicznych jest modyfikowanie ich cech, a zwłaszcza ingerencja w barwę i przejrzystość. W tym celu stosuje się różne zabiegi (np. wyprężanie, napromieniowanie, barwienie), które obejmuje się wspólnym mianem „traktowanie”, a materiały przekształcone tymi sposobami określa się jako „traktowane”. Wiele procedur traktowania pozostaje pilnie strzeżoną tajemnicą zawodową przekazywaną z pokolenia na pokolenie.

Wszystko to zrodziło potrzebę wiarygodnej identyfikacji i oceny niezbędnej dla właściwego funkcjonowania obrotu materiałami gemmologicznymi. Brak możliwości weryfikacji określonego surowca powoduje szybką degradację jego obrotu (obniżenie popytu, spadek cen, ograniczenie poszukiwania i wydobywania). Sytuacje takie możliwe są obecnie tylko na krótki czas. Pomoc nadchodzi zwykle od strony gemmologicznych instytucji badawczych posiadających dostateczny potencjał dla wypracowania kryteriów identyfikacji i oceny występujących lub pojawiających się w obrocie rynkowym imitacji i nowych surowców gemmologicznych pochodzenia naturalnego i syntetycznego. Do najsilniejszych ośrodków tego rodzaju należy zaliczyć: Gemological Institute of America (GIA), Deutsche Gemmologische Gesellschaft (DGG), Association Française de Gemmologie (AFG), Gemmological Association of Great Britain (GAGB), Gemmological Association of All Japan (GAJJ).

Nowoczesna ocena i identyfikacja materiałów gemmologicznych wymaga stosowania coraz to bardziej wyrafinowanych metod i aparatury adekwatnych do dokonującego się postępu w inżynierii materiałowej. Poleganie na organoleptycznym badaniu doświadczonego, wytrawnego znawcy materiałów gemmologicznych w dobie rosnącej jakości materiałów syntetycznych oraz coraz

nowocześniejszych metod traktowania jest już niewystarczające i zawodne. Ponieważ każdy obiekt poddany badaniu jest potencjalnie unikatowy, zastosowane metody identyfikacji i oceny muszą być z swojej natury nieniszczące. Jest to dodatkowa przeszkoda, którą muszą pokonać zwykle twórcy procedur identyfikacyjnych. W przeszłości opierano się głównie na metodach wykorzystujących własności optyczne badanych obiektów. Ten zakres aktywności gemmologicznej można określić mianem gemmologii klasycznej (podstawowej). Dokonujący się postęp w inżynierii materiałowej zmusza jednak do sięgania po metody pogłębionej analizy materiałowej opierające się głównie na zjawiskach wynikających z dyskretnego oddziaływania fali elektromagnetycznej z materią (np. spektroskopia w podczerwieni, spektroskopia ramanowska, fluorescencja rentgenowska, mikroskopia elektronowa). Ten obszar aktywności gemmologicznej można uważać za gemmologię nowoczesną (pogłębioną). W rezultacie w ostatnich latach gemmologia stała się tą dziedziną, w której współpracują ze sobą specjaliści z różnych działów nauki zajmujących się ciałem stałym, a zwłaszcza fizycy, mineralodzy, chemicy, technolodzy. Osiągane wyniki służą nie tylko gemmologii, ale przyczyniają się do postępu w wielu innych dziedzinach nauki, np. w inżynierii materiałowej, elektronice, fizyce ciała stałego, których udoskonalanie warunkuje dalszy rozwój współczesnej cywilizacji.

Umiejętność identyfikacji materiałów gemmologicznych, nawet na poziomie podstawowym, wymaga dużej dozy wiedzy teoretycznej popartej stosowną praktyką. Niniejszy podręcznik ma wskazać i ułatwić pierwsze kroki w tym kierunku adeptom tej dyscypliny. Osiągnięciu tego celu podporządkowano układ treści, dobór prezentowanych zagadnień oraz zestaw ilustracji. W trosce o jednolitość i przejrzystość treści zdecydowano się na pewne uproszczenia. W rezultacie w stosunkowo niedużej objętości pomieszczono wiadomości niezbędne początkującemu miłośnikowi materiałów gemmologicznych. Zakres zawartych w podręczniku wiadomości wystarcza do nabycia podstawowych umiejętności w zakresie standardowej identyfikacji materiałów gemmologicznych. Czytelnicy zainteresowani pogłębianiem określonych zagadnień znajdą w bibliografii odpowiednie pozycje oryginalnej literatury, przeważnie jednak zagranicznej.



Termin gemmologia wywodzi się od słów *gemma* i *logos*. Łacińskie słowo *gemma* oznaczało najpierw każdy kamień szlachetny, następnie kamień grawerowany służący do pieczętowania, a później kamień noszony także jako ozdoba. *Gemma* miała płaskorzeźbę rżniętą wypukło (*kamea*) lub wklęsło (*intaglio*). Greckie słowo *logos* oznacza naukę, mowę.

Początki gemmologii sięgają zamierzchłych czasów. Za najstarsze opisy kamieni szlachetnych należy uznać wzmianki zawarte w *Biblii* oraz w *Iliadzie* i *Odysei*. Wiele miejsca poświęcił kamieniom szlachetnym Pliniusz Starszy

w dziele „*Historiae naturalis*”. Równie odległych czasów sięgają takie dzieła, jak „*Papyrus Graecus Holmiensis*” opracowany przez O. Lagercrantz (1913), czy „*O kamieniach*” Teofrasta. Kolejne wieki przynosiły coraz to większą liczbę dzieł poświęconych w różnym stopniu kamieniom szlachetnym. Do najbardziej znaczących należą prace G. Agricoli (1546), T. Nicholasa (1652), J. B. Taverniera (1672), L. Dutensa (1783), J. R. Haüy’ego (1817), K. K. Klugego (1860), C. W. Kinga (1870), A. H. Churcha (1883), M. D. A. Rothschilda (1891), C. A. Doeltera (1893) i M. Bauera (1896). Ostatnie stulecie to okres niezwyklego rozkwitu gemmologii. Wyróżnia go ogromna liczba publikacji, powstanie i rozwój licznych towarzystw i instytutów gemmologicznych (*Appendix*), pojawienie się periodyków gemmologicznych, wysokiej jakości atlasów, banków danych, kompendiów, rozwój różnorodnych form kształcenia i szkolenia gemmologicznego, wypracowanie przez gemmologię własnych metod badawczych i dostosowanego do nich instrumentarium, rozwój różnych form muzealnictwa i kolekcjonerstwa, wreszcie wypracowanie norm prawnych zabezpieczających i regulujących obrót materiałami gemmologicznymi. Dla niektórych państw pozyskanie, przetwórstwo i obrót materiałami gemmologicznymi stały się też żywotną dziedziną gospodarki.

Wraz z postępem wiedzy i ciągłymi przemianami dostosowawczymi współczesna gemmologia stała się nauką o materiałach gemmologicznych.* Funkcjonując na styku mineralogii, fizyki i chemii materiałów oraz inżynierii materiałowej, zajmuje się głównie badaniem składu, struktury i własności materiałów gemmologicznych, ich genezą i pochodzeniem, technikami pozyskiwania i przetwarzania. Ważnym zajęciem gemmologii jest również wypracowywanie nieniszczących procedur identyfikacyjnych.

Materiały gemmologiczne można podzielić na:

- **Naturalne.** Są to materiały pochodzenia naturalnego (przeważnie minerały) podatne na szlifowanie i polerowanie, trwałe, a wykorzystywane przez człowieka głównie z uwagi na ich walory estetyczne (np. barwę, przezroczystość, barwne efekty optyczne).
- **Syntetyczne.** Są to materiały pozyskiwane procedurami opracowanymi przez człowieka. Wiele z nich powstaje na wzór materiałów naturalnych (ta sama formuła chemiczna, struktura, własności fizyczne itp.). Niektóre z tych materiałów, nie mające odpowiednika w przyrodzie, określa się jako sztuczne, np. sztuczne granaty (GGG, YAG). Gemmologia interesuje się głównie tymi materiałami syntetycznymi, które mogą być wykorzystywane ze względu na ich walory estetyczne.

* Gemmologię definiowano dotychczas jako: „dyscyplinę nauki o kamieniach jubilerskich” (Gunia, 1996), „naukę o kamieniach szlachetnych i ozdobnych” (Heflik, 1996), czy „naukę o badaniu kamieni szlachetnych” (Maślankiewicz, 1982).

- **Traktowane (poprawiane).** Są to materiały naturalne i syntetyczne, których cechy i właściwości zostały zmodyfikowane procesami inicjowanymi i kontrolowanymi przez człowieka w taki sposób, by podnieść ich walory estetyczne.

W gemmologii używany jest również termin *imitacja* na określenie materiału naturalnego lub syntetycznego, którego przeznaczeniem jest mniej lub bardziej udane naśladowanie określonego materiału naturalnego, choć niekiedy różnią się one znacznie pod względem składu chemicznego i struktury od naśladowanego materiału. Niektóre z tych materiałów bywają sztucznie modyfikowane traktowaniem w celu lepszego upodobnienia się do pierwowzoru.

2. Podstawowe pojęcia krystalograficzne

Większość materiałów gemmologicznych stanowią materiały krystaliczne — bardzo często monokrystaliczne. Toteż przytoczenie pewnych pojęć krystalograficznych będzie pożyteczne dla lepszego zrozumienia ich własności i stosowanych procedur identyfikacyjnych lub badawczych.

Zespół typowych własności fizycznych charakteryzujących kryształy jest ich konstytucją fizyczną. Kryształy to ciała o prawidłowej, uporządkowanej budowie wewnętrznej. Cecha ta różni je od ciał bezpostaciowych, np. szkła. Kryształy powstałe w wyniku procesów naturalnych, geologicznych nazywa się minerałami.

Uporządkowana budowa wewnętrzna kryształu warunkuje inne jego własności, jak:

- **anizotropowość**, czyli wykazywanie zależności niektórych własności od kierunku; anizotropię sprężystości i prędkości wzrostu wykazują wszystkie kryształy; pozostałe własności kryształów mogą być bądź to anizotropowe, bądź to izotropowe; ważną konsekwencją anizotropii prędkości wzrostu w warunkach swobodnego narastania jest samorzutne tworzenie się prawidłowych postaci wielościennych;
- **jednorodność fizyczną**, czyli wykazywanie w każdym miejscu kryształu jednakowych własności fizycznych skalarnych; jest to jednak zależne od skali, w jakiej przeprowadza się obserwację, gdyż ciało jednorodne makroskopowo może się okazać niejednorodne mikroskopowo;
- **jednorodność chemiczną**, czyli wykazywanie w każdym miejscu kryształu jednakowego składu chemicznego; jednak wskutek różnych zakłóceń zachodzących podczas narastania kryształu jednorodność chemiczna nie zawsze bywa w pełni zachowana, np. z powodu budowy strefowej.

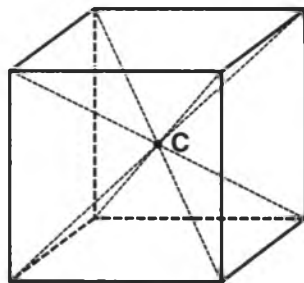
Kryształy często wykazują obecność wielu charakterystycznych cech zewnętrznych, które są uwarunkowane ich prawidłową, uporządkowaną budową wewnętrzną.

2.1. Elementy symetrii kryształów

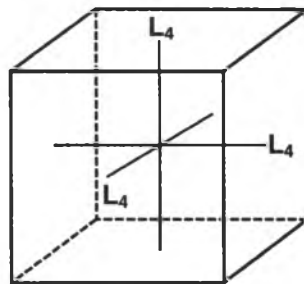
Prawidłowe powtarzanie się w przestrzeni jednakowych pod względem geometrycznym i fizycznym części kryształów, np. ścian, krawędzi, naroży określane jest mianem symetrii kryształów. Przejawia się ona w ich postaciach, strukturze i właściwościach fizycznych. Symetrię określa się za pomocą tzw. makroskopowych elementów symetrii (czyli dających się zaobserwować na wielościennej postaci kryształu):

- **środek symetrii** (symbol **C**), czyli punktu położonego wewnątrz kryształu, który ma tę własność, że na dowolnej prostej przeprowadzonej przez ten punkt, w jednakowej od niego odległości, znajdują się jednakowe pod względem geometrycznym i fizycznym punkty kryształu (rys. 1),
- **osi symetrii** (symbol **Lⁿ**), czyli prostej, wokół której powtarzają się jednakowe części kryształu, przy czym części te mogą się powtarzać co kąt $\alpha = 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 360^\circ$; liczbę $n = 360/\alpha$ nazywa się krotnością osi symetrii; w kryształach możliwe są osie jedno- (L^1), dwu- (L^2), trój- (L^3), cztero- (L^4) i sześciokrotne (L^6), (rys. 2),
- **płaszczyzny symetrii** (symbol **P**), czyli płaszczyzny dzielące kryształ na dwie części pozostające względem siebie w takim stosunku jak przedmiot do swego obrazu w zwierciadle płaskim (rys. 3).

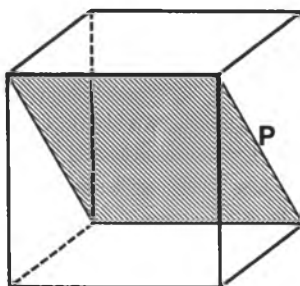
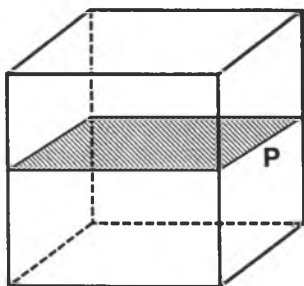
Wymienione elementy symetrii kryształu określa się mianem prostych. W niektórych kryształach występują złożone elementy symetrii, jak np. **oś inwersyjna** (symbol **A**) działająca



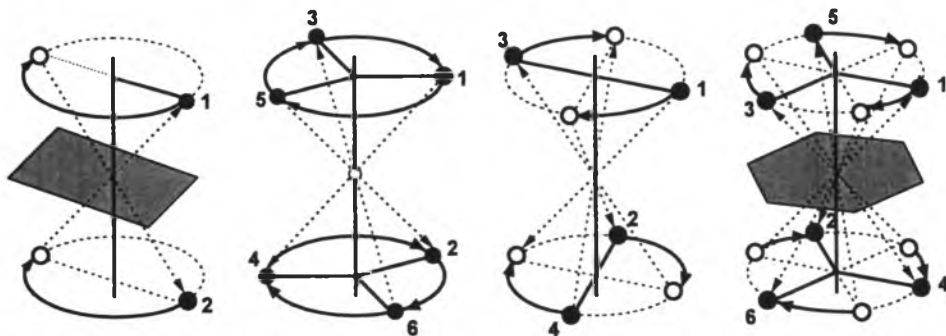
Rys. 1. Środek symetrii kryształu (C) (wg Payette, 1994)



Rys. 2. Osie symetrii kryształu (L_4 — czterokrotna oś symetrii kryształu) (wg Payette, 1994)



Rys. 3. Płaszczyzny symetrii kryształu (P) (wg Payette, 1994)



Rys. 4. Działanie osi inwersyjnej i osi przemiennej (numeracja oznacza kolejne położenia punktu 1) (wg Ramdohra, Strunza, 1978)

w ten sposób, że dana część kryształu powtarza się dopiero po wykonaniu przekształceń względem środka i osi symetrii, lub **oś przemienna** (zwana też zwierciadlaną), czyli oś otrzymywana przez sprzężenie osi symetrii z prostopadłą do niej płaszczyzną symetrii (rys. 4).

Jeżeli kierunek osi symetrii lub osi inwersyjnej jest zgodny z kierunkiem osi krystalograficznej lub jeżeli płaszczyzna symetrii jest prostopadła do osi krystalograficznej, to symbol osi symetrii, osi inwersyjnej lub płaszczyzny symetrii opatrywany jest indeksem osi krystalograficznej (X, Y, Z) (np.: L_x^2 oznacza dwukrotną oś symetrii równoległą do osi krystalograficznej X).

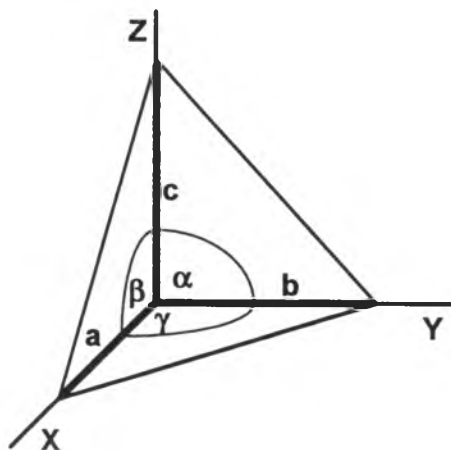
2.2. Układy krystalograficzne

Niektóre kryształy można opisać za pomocą jednakowego układu odniesienia. W jego skład wchodzi:

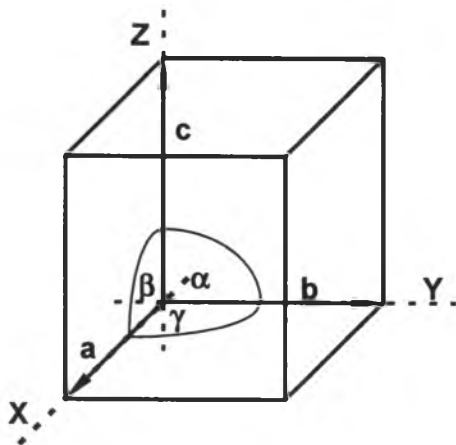
- osie krystalograficzne X, Y, Z ,
- odcinki a, b, c , jakimi odmierza się na tych osiach,
- kąty α, β, γ zawarte pomiędzy osiami krystalograficznymi.

Kąty zawarte pomiędzy osiami krystalograficznymi oraz odcinki a, b, c stanowią tzw. stałe sieciowe (rys. 5); wyznaczają one kształt komórki elementarnej. Jest to równoległościan zbudowany na stałych sieciowych, których długości są równe odległościom między identycznymi atomami w kryształach w kierunkach osi krystalograficznych, a odległości te są rzędu 10^{-8} cm (rys. 6). Wskutek translacji (przesunięcia równoległego) komórki elementarnej w kierunku jej trzech nierównoległych krawędzi (tj. trzech osi krystalograficznych) otrzymuje się tzw. sieć przestrzenną kryształu charakteryzującą w pierwszym przybliżeniu budowę wewnętrzną kryształu.

Kryształy mają różny stopień symetrii geometrycznej i różne stałe sieciowe. Na tej podstawie pogrupowano je w układy krystalograficzne, biorąc za kryterium system osi krystalograficznych (tab. 1).



Rys. 5. Krystalograficzny układ odniesienia. Stałe sieciowe: a , b , c i α , β , γ . Osie krystalograficzne: X , Y , Z



Rys. 6. Komórka elementarna (objaśnienia jak na rys. 5)

Tabela 1

Podstawowe parametry układów krystalograficznych

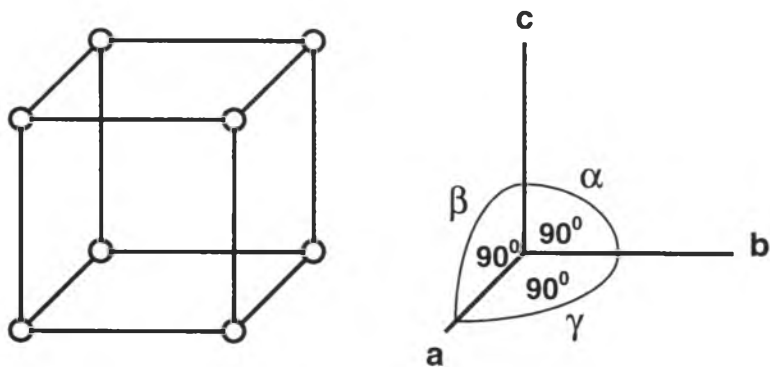
Układ krystalograficzny	Niezbędne elementy symetrii charakteryzujące układ	Stałe sieciowe
Trójskośny	L^1 lub C	$a \neq b \neq c$; $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
Jednoskośny	L^2 lub P	$a \neq b \neq c$; $\alpha = \gamma = 90^\circ$, $\beta \neq 90^\circ$
Rombowy	$3L^2$ lub $L^2 \parallel P$	$a \neq b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Tetragonalny	L^4 lub A^4	$a = b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Trygonalny (romboedryczny)	L^3	$a = b = c$; $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
Heksagonalny	L^6	$a = b \neq c$; $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$ bądź też: $a_1 = a_2 = a_3 \neq c$; $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$
Regularny	$4L^3$	$a = b = c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

Układ regularny

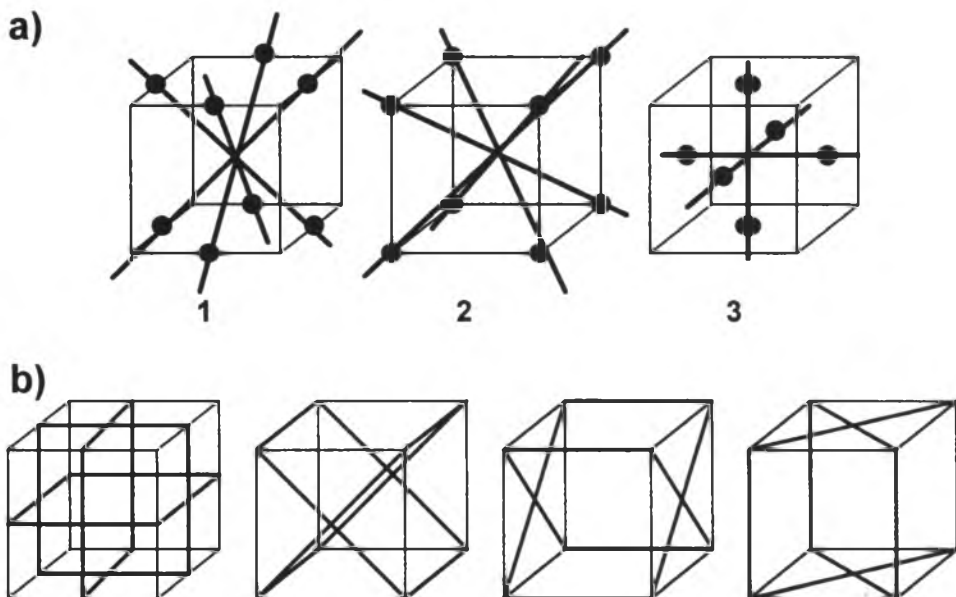
Komórka elementarna ma w tym układzie równe sobie stałe sieciowe (rys. 7), a kryształy charakteryzują się najwyższym poziomem symetrii geometrycznej. W rezultacie w kryształach układu regularnego można znaleźć największą liczbę elementów symetrii:

$3L^4/3P$; $4L^3$; $6L^2/6P$; C ; tj.:

— 13 osi symetrii (6 dwukrotnych — L^2 , 4 trzykrotne — L^3 , 3 czterokrotne — L^4),



Rys. 7. Układ regularny. Komórka elementarna i stałe sieciowe (objaśnienia jak na rys. 5)



Rys. 8. Układ regularny. Elementy symetrii komórki elementarnej
a) osie symetrii: 1 — dwukrotne, 2 — trzykrotne, 3 — czterokrotne; *b*) płaszczyzny symetrii

- 9 płaszczyzn symetrii — **P** (prostopadłych do dwukrotnych i czterokrotnych osi symetrii),
- środek symetrii — **C** (rys. 8).

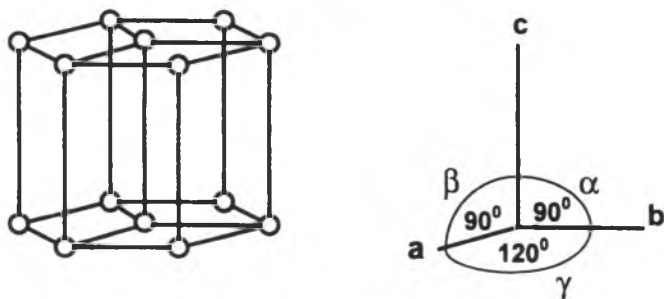
Minimalny poziom symetrii kryształów układu regularnego określa obecność czterech trzykrotnych osi symetrii.

Układ heksagonalny

Komórka elementarna tego układu ma kształt słupa heksagonalnego (rys. 9). Z tego względu kąty międzyosiowe i parametry ściany jednostkowej są różne, wynosząc odpowiednio:

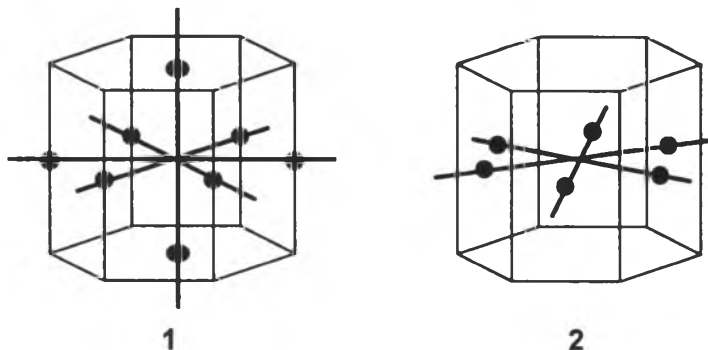
$$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ,$$

$$a = b \neq c.$$

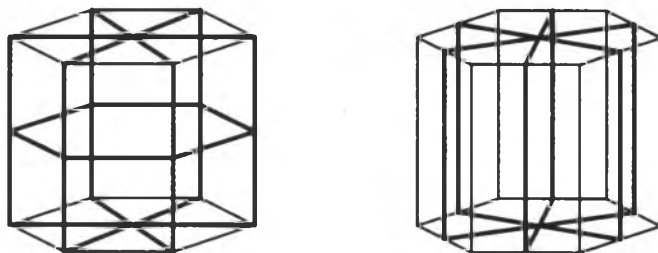


Rys. 9. Układ heksagonalny. Komórka elementarna i stałe sieciowe (układ Millera) (objaśnienia jak na rys. 5)

a)



b)



Rys. 10. Układ heksagonalny. Elementy symetrii komórki elementarnej
a) osie symetrii: 1 — dwukrotne i sześciokrotna, 2 — dwukrotne, b) płaszczyzny symetrii

w układzie trzech osi krystalograficznych X, Y, Z , czyli w tzw. układzie Millera, bądź też:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 90^\circ, \gamma = 120^\circ, \\ a_1 = a_2 = a_3 \neq c.$$

w układzie czterech osi krystalograficznych, czyli w tzw. układzie Bravais'go zbudowanym na trzech równoważnych osiach X_1, X_2, X_3 tworzących ze sobą kąty 120° i występujących w jednej płaszczyźnie prostopadłej względem czwartej osi, którą jest oś Z , a która niekiedy jest nazywana osią główną tego układu.

W kryształach z układu heksagonalnego można znaleźć maksymalnie:

$L^6/P; 3L^2/3P; 3L^2/3P''; C$; tj.:

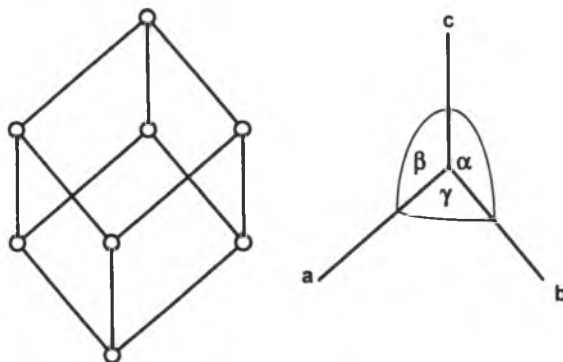
- 7 osi symetrii (6 dwukrotnych, 1 sześciokrotną),
- 7 płaszczyzn symetrii (prostopadłe do osi symetrii),
- środek symetrii (rys. 10).

Minimalny poziom symetrii kryształów zaliczanych do układu heksagonalnego określa wystąpienie sześciokrotnej osi symetrii.

Układ trygonalny (romboedryczny)

Komórka elementarna tego układu ma kształt romboedru (rys. 11). Z tego względu stosunki kątowe i osiowe przedstawiają się następująco:

$$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ, \\ a = b = c.$$

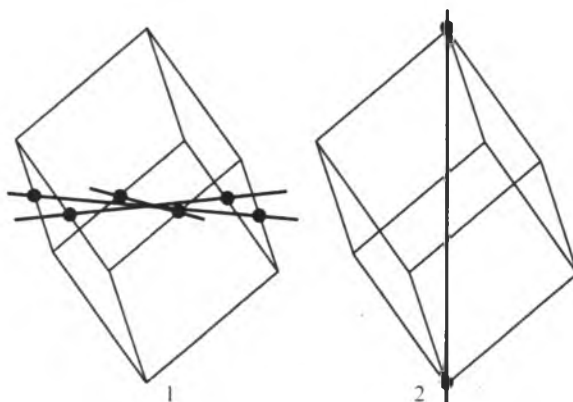


Rys. 11. Układ trygonalny. Komórka elementarna i stałe sieciowe (objaśnienia jak na rys. 5)

W kryształach z układu trygonalnego można znaleźć maksymalnie:

$L^3; 3L^2/3P; C$; tj.:

- 4 osie symetrii (3 dwukrotne, 1 trzykrotną),
- 3 płaszczyzny symetrii (prostopadłe do dwukrotnych osi symetrii),
- środek symetrii (rys. 12).



Rys. 12. Układ trygonalny. Elementy symetrii komórki elementarnej
1 — osie dwukrotne, 2 — oś trzykrotna

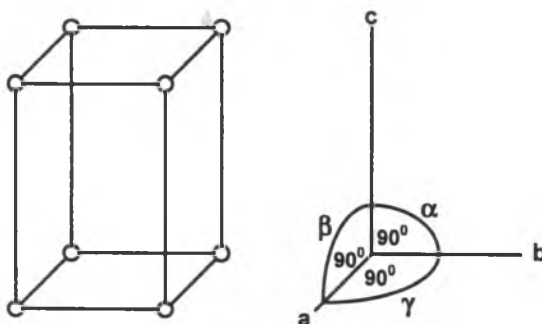
Minimalną symetrię kryształów trygonalnych wyznacza obecność trzykrotnej osi symetrii.

Układ tetragonalny

Komórka elementarna układu tetragonalnego ma kształt prostopadłościanu o podstawie kwadratowej (słupa tetragonalnego) (rys. 13). W tej komórce stałe sieciowe spełniają następujące zależności:

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ,$$

$$a = b \neq c.$$

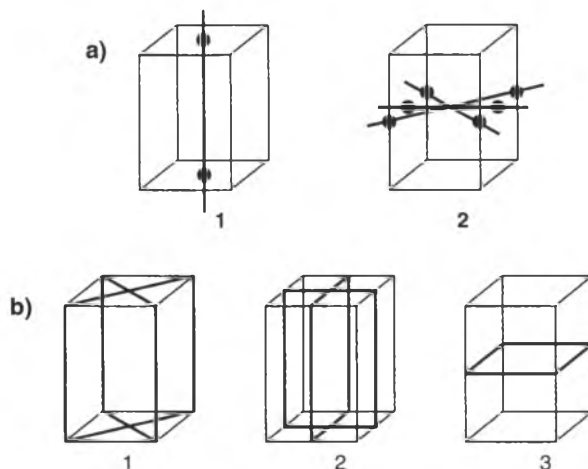


Rys. 13. Układ tetragonalny. Komórka elementarna i stałe sieciowe (objaśnienia jak na rys. 5)

W takich kryształach można napotkać maksymalnie:

L^4/P ; $2L^2/2P$; $2L^{2''}/2P''$; C; tj.:

- 5 osi symetrii (4 dwukrotne, 1 czterokrotną),
- 5 płaszczyzn symetrii (prostopadłe do osi symetrii),
- środek symetrii (rys. 14).



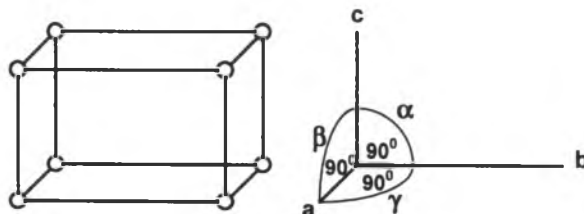
Rys. 14. Układ tetragonalny. Elementy symetrii komórki elementarnej
a) osie symetrii: 1 — czterokrotna, 2 — dwukrotna, b) płaszczyzny symetrii:
1 i 2 — prostopadłe do dwukrotnych osi symetrii, 3 — prostopadła do czterokrotnej osi symetrii

Minimalną symetrię kryształów tetragonalnych określa występowanie czterokrotnej osi symetrii.

Układ rombowy

Komórka elementarna układu rombowego ma kształt prostopadłościanu (rys. 15). Jej stałe sieciowe spełniają następujące warunki:

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ, \\ a \neq b \neq c.$$

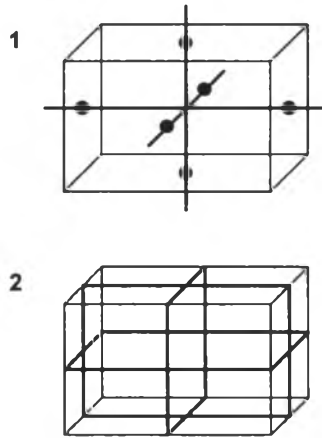


Rys. 15. Układ rombowy. Komórka elementarna i stałe sieciowe (objaśnienia jak na rys. 5)

W kryształach z układu rombowego można znaleźć maksymalnie:

$3L^2/3P$; C; tj.:

- 3 osie symetrii (osie dwukrotne),
- 3 płaszczyzny symetrii (prostopadłe do osi symetrii),
- środek symetrii (rys. 16).



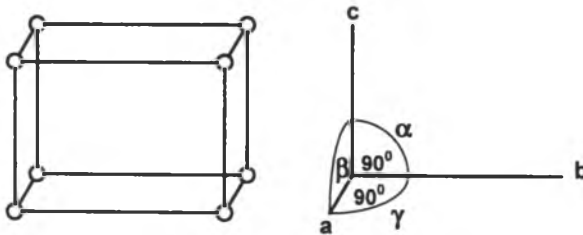
Rys. 16. Układ rombowy. Elementy symetrii komórki elementarnej
1 — dwukrotne osie symetrii, 2 — płaszczyzny symetrii

Minimalną symetrię kryształów rombowych wyznacza obecność trzech dwukrotnych osi symetrii lub osi dwukrotnej i dwóch płaszczyzn symetrii.

Układ jednoskośny

W tym układzie wszystkie krawędzie komórki elementarnej różnią się długością, a kąt zawarty między osiami X i Z nie jest prosty (rys. 17):

$$\alpha = \gamma = 90^\circ; \beta \neq 90^\circ, \\ a \neq b \neq c.$$

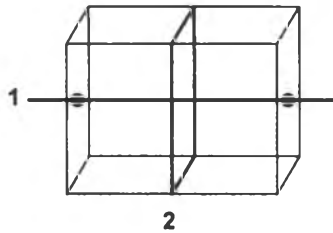


Rys. 17. Układ jednoskośny. Komórka elementarna i stałe sieciowe (objaśnienia jak na rys. 5)

W kryształach z układu jednoskośnego występują najwyżej:

L^2/P ; C ; tj.:

- dwukrotna oś symetrii,
- płaszczyzna symetrii,
- środek symetrii (rys. 18).



Rys. 18. Układ jednoskośny. Elementy symetrii komórki elementarnej
1 — oś dwukrotna, 2 — płaszczyzna symetrii

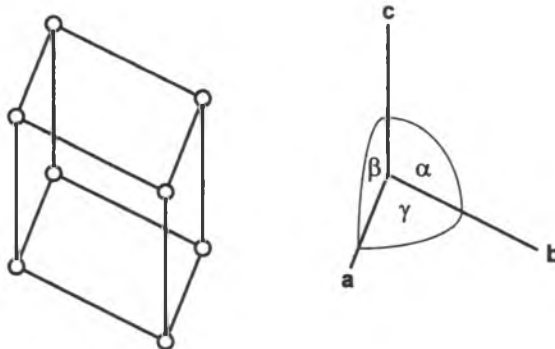
Minimalną symetrię kryształów jednoskośnych określa występowanie dwukrotnej osi symetrii lub płaszczyzny symetrii.

Układ trójskośny

Wszystkie parametry komórki elementarnej kryształów układu trójskośnego różnią się między sobą (rys. 19):

$$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ,$$

$$a \neq b \neq c.$$



Rys. 19. Komórka elementarna układu trójskośnego (objaśnienia jak na rys. 5)

Kryształy z układu trójskośnego charakteryzują się najniższym poziomem symetrii. Można w nich znaleźć jedynie środek symetrii C; minimalną symetrię takich kryształów określa brak elementów symetrii (osie tylko jednokrotne).

2.3. Morfologia kryształów

Zewnętrzny wygląd kryształów o ukształtowanych elementach ograniczających — ścianach, krawędziach, narożach — jest bardzo pomocny w ich rozróżnianiu. Pozwala on także wyciągać wnioski o ich genezie i pochodzeniu.

Przydaje się również w praktycznym wykorzystaniu kryształów (np. w czasie szlifowania). Zewnętrzny wygląd kryształów określa ich postać krystalograficzna i wykształcenie.

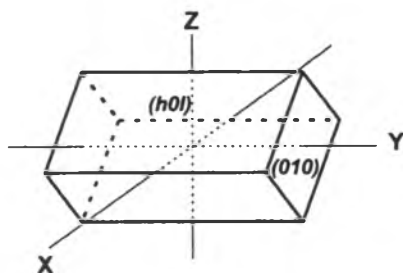
2.3.1. Postać krystalograficzna

Zespół ścian przechodzących w siebie na skutek przekształceń związanych z obecnymi w kryształach elementami symetrii makroskopowej nazywa się postacią krystalograficzną. W kryształach wyróżnia się postacie:

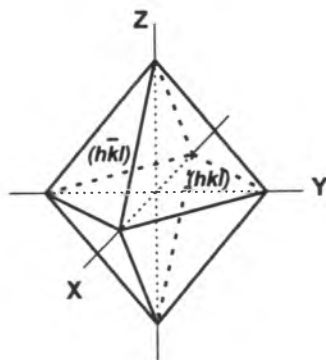
- **proste**, czyli zespół ścian symetrycznie równoważnych,
- **złożone**, czyli kombinacje postaci prostych.

Wśród postaci prostych wyróżnia się:

- szczególne, czyli mające ściany ułożone prostopadle, równolegle lub symetrycznie względem elementów symetrii lub osi krystalograficznych (rys. 20),



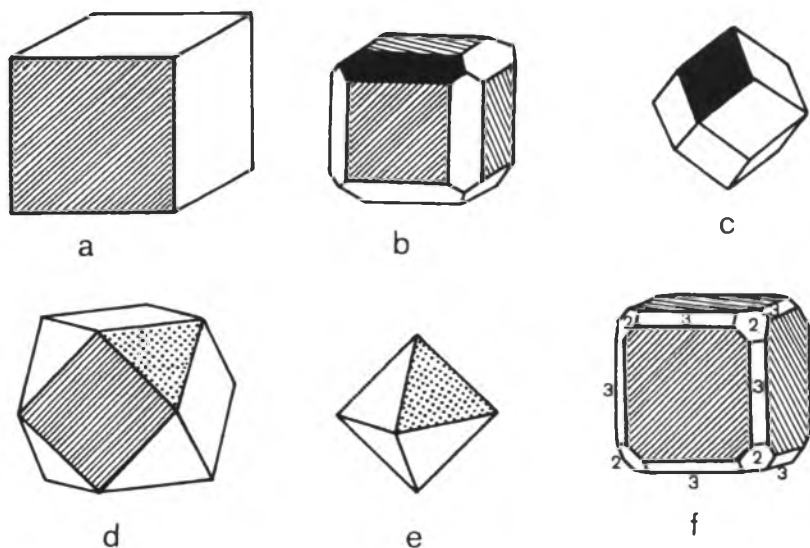
Rys. 20. Postać prosta szczególna kryształu (wskaźniki ścian zawierają zero (X , Y , Z — osie krystalograficzne)) (wg Bolewskiego i in., 1990)



Rys. 21. Postać prosta ogólna kryształu (wskaźniki ścian nie zawierają zera (X , Y , Z — osie krystalograficzne)) (wg Bolewskiego i in., 1990)

— ogólne, czyli mające ściany nachylone skośnie względem elementów symetrii lub osi krystalograficznych (rys. 21).

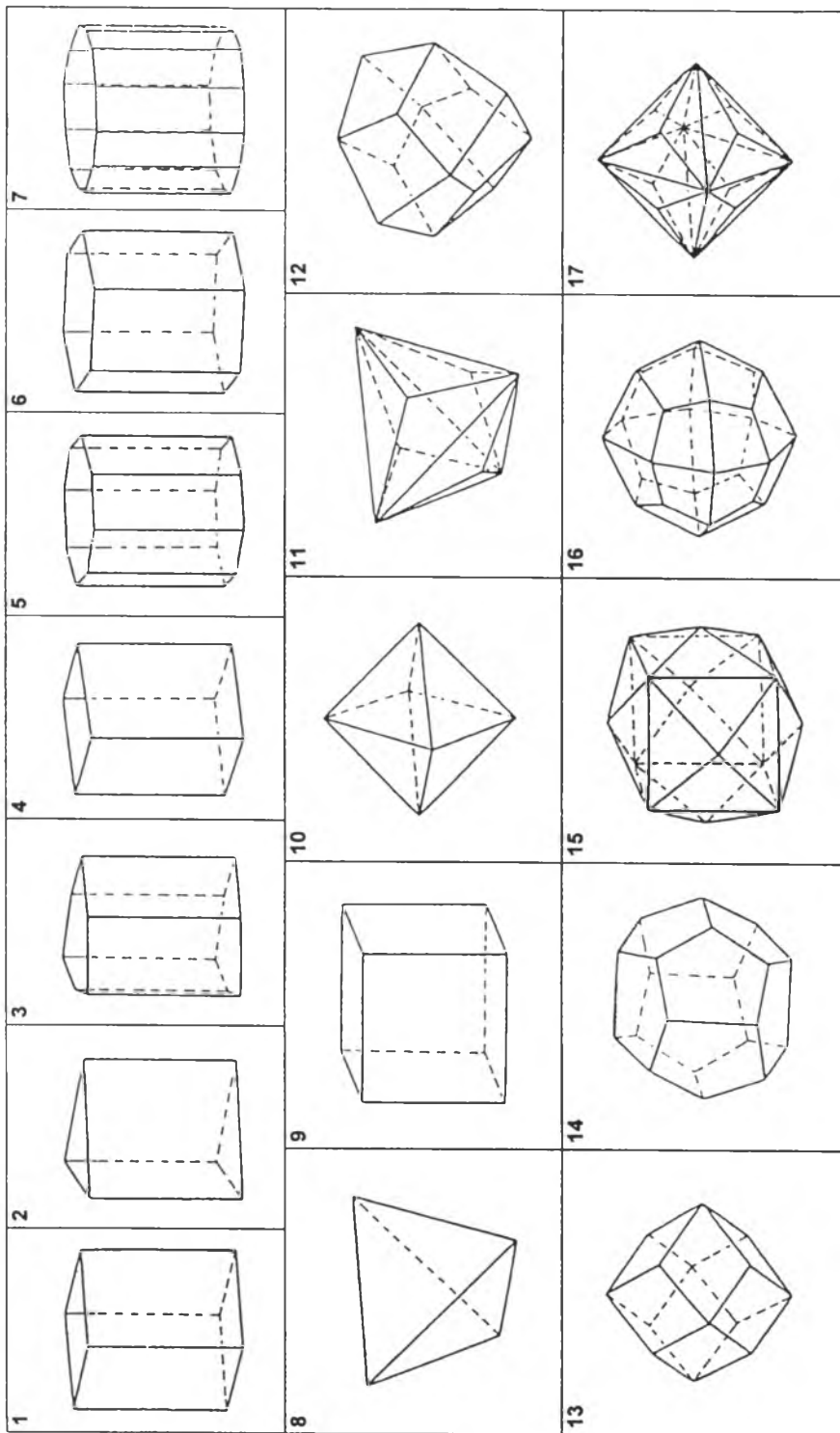
Postać powstała z kombinacji dwu lub większej liczby postaci prostych określana jest mianem postaci złożonej (rys. 22). Postaci prostych jest 49; w tej liczbie znajdują się 32 postaci ogólne oraz 17 postaci szczególnych (rys. 23, 24). Postacie proste pogrupowano w klasy krystalograficzne (tab. 2). Wszystkie kryształy należące do jednej klasy mają jednakowe makroskopowe elementy symetrii. Nazwy poszczególnych klas krystalograficznych wywodzą się z postaci prostych ogólnych.

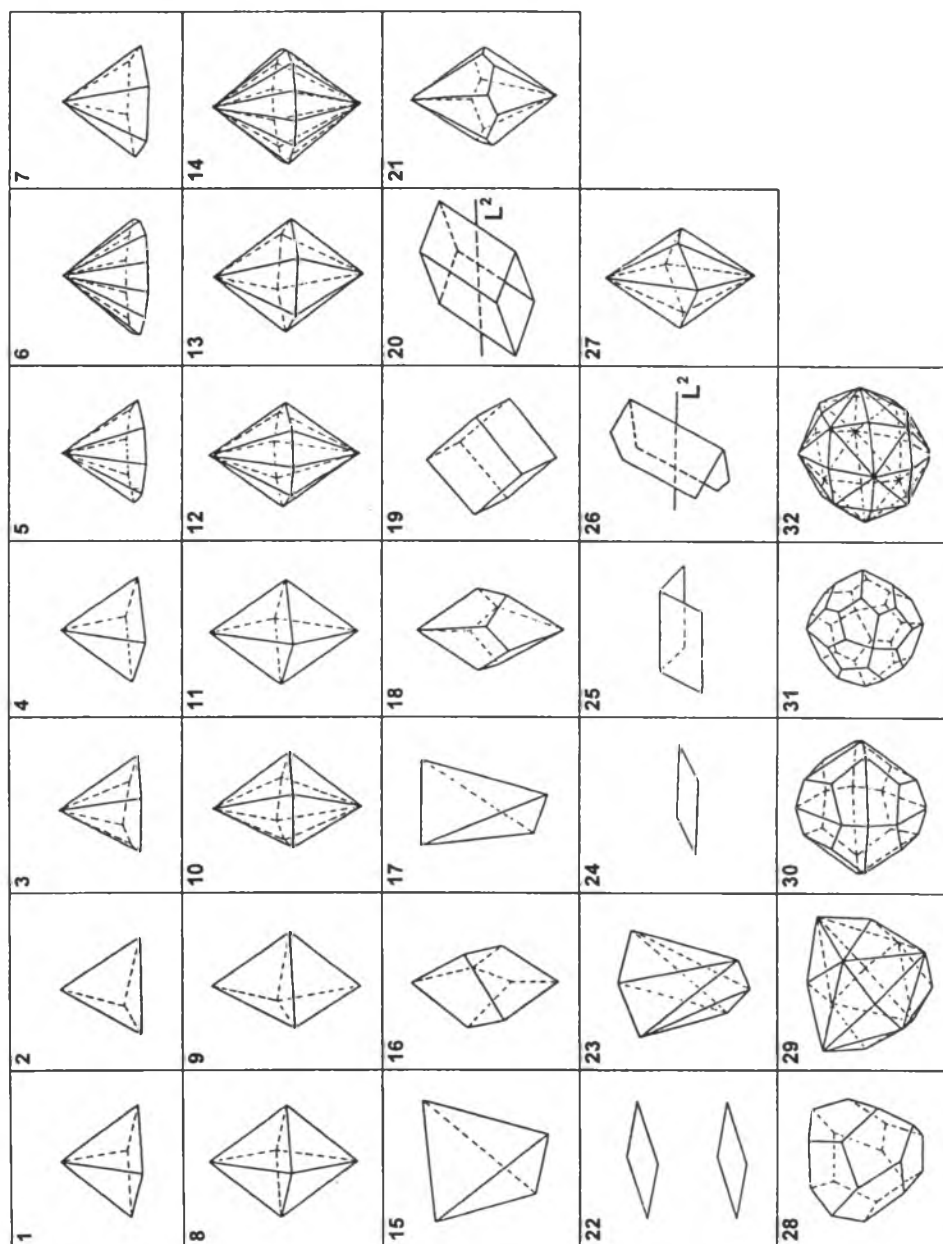


Rys. 22. Złożone postaci kryształu (*b*, *d*) powstałe w wyniku kombinacji sześcianu (*a*) z ośmiościanem (*e*) lub dwunastościanem rombowym (*c*); złożona postać kryształu (*f*) jako rezultat jednoczesnej kombinacji sześcianu (ściany pokryte szrafurą) z ośmiościanem (ściany oznaczone dwójką) i dwunastościanem rombowym (ściany oznaczone trójką)

Rys. 23. Krystalograficzne postaci proste szczególne

1 — słup rombowy, 2 — słup trygonalny, 3 — słup dytrygonalny, 4 — słup tetragonalny, 5 — słup dytetragonalny, 6 — słup heksagonalny, 7 — słup dyheksagonalny, 8 — tetraedr, 9 — sześcian (heksaedr), 10 — ośmiościan (oktaedr), 11 — czworościan potrójny, 12 — dwunastościan deltoidowy, 13 — dwunastościan rombowy, 14 — dwunastościan pentagonalny, 15 — sześcian poczwórny, 16 — dwudziestoczworościan deltoidowy, 17 — ośmiościan potrójny





Rys. 24. Krystalograficzne postacie proste ogólne

1 — piramida rombowa, 2 — piramida trygonalna, 3 — piramida dytrygonalna, 4 — piramida tetragonalna, 5 — piramida dytetragonalna, 6 — piramida heksagonalna, 7 — piramida dyheksagonalna, 8 — podwójna piramida rombowa, 9 — podwójna piramida trygonalna, 10 — podwójna piramida dytrygonalna, 11 — podwójna piramida tetragonalna, 12 — podwójna piramida dytetragonalna, 13 — podwójna piramida heksagonalna, 14 — podwójna piramida dyheksagonalna, 15 — czworościan rombowy, 16 — trapezoedr trygonalny, 17 — czworościan tetragonalny, 18 — trapezoedr tetragonalny, 19 — romboedr, 20 — słup jednoskośny, 21 — trapezoedr heksagonalny, 22 — dwuscian (pinakoid), 23 — skalenoedr tetragonalny, 24 — jednościan, 25 — daszek, 26 — sfenoid, 27 — skalenoedr trygonalny, 28 — dwunastościan tetraedryczno-pentagonalny, 29 — czworościan poszostny, 30 — dwunastościan pentagonalny podwójny, 31 — dwudziestoczterościan pentagonalny, 32 — czterdziestościan regularny

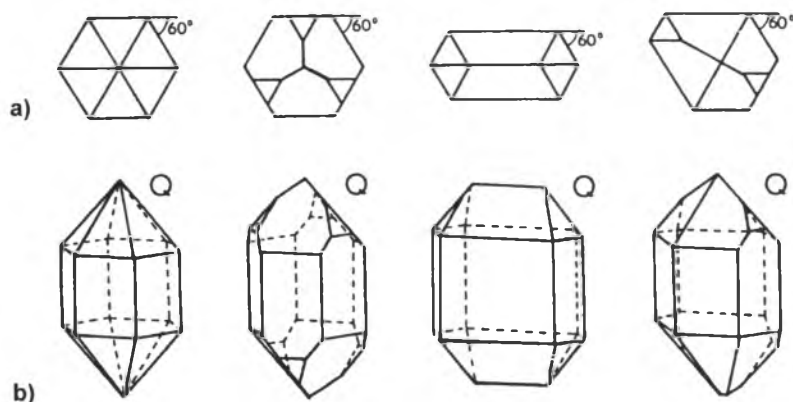
Klasy krystalograficzne

Układ krystalograficzny	Numer klasy	Klasa	Elementy symetrii
Trójskośny	1	jednościanu (pedionalna)	L^1
	2	dwuścianu (pinakoidalna)	C
Jednoskośny	3	sfenoidu jednoskośnego	L^2
	4	daszka jednoskośnego (domatyczna)	P
	5	słupa jednoskośnego (pryzmatyczna)	L^2PC
Rombowy	6	piramidy rombowej	L^22P
	7	czworościanu (bisfenoidu) rombowego	$3L^2$
	8	podwójnej piramidy rombowej	$3L^23PC$
Tetragonalny	9	czworościanu (bisfenoidu) tetragonalnego	A^4
	10	piramidy tetragonalnej	L^4
	11	podwójnej piramidy tetragonalnej	L^4PC
	12	skalenoedru tetragonalnego	A^42L^22P
	13	piramidy dytetragonalnej	L^44P
	14	trapezoedru tetragonalnego	L^44L^2
	15	podwójnej piramidy dytetragonalnej	L^44L^25PC
Trygonalny (romboedryczny)	16	piramidy trygonalnej	L^3
	17	romboedru	L^3C
	18	piramidy dytrygonalnej	L^33P
	19	trapezoedru trygonalnego	L^33L^2
	20	skalenoedru trygonalnego	L^33L^23PC
	21	podwójnej piramidy trygonalnej	L^3P
	22	podwójnej piramidy dytrygonalnej	L^33L^24P
Heksagonalny	23	piramidy heksagonalnej	L^6
	24	podwójnej piramidy heksagonalnej	L^6PC
	25	piramidy dyheksagonalnej	L^66P
	26	trapezoedru heksagonalnego	L^66L^2
	27	podwójnej piramidy dyheksagonalnej	L^66L^27PC
Regularny	28	dwunastościanu tetraedryczno- -pentagonalnego	$4L^33L^2$
	29	dwunastościanu pentagonalnego podwójnego	$4L^33L^23PC$
	30	czworościanu poszóstnego	$3A^44L^36P$
	31	dwudziestoczterościanu pentagonalnego	$3L^44L^36L^2$
	32	czterdziestoośmiościanu	$3L^44L^36L^29PC$

2.3.2. Prawo stałości kątów

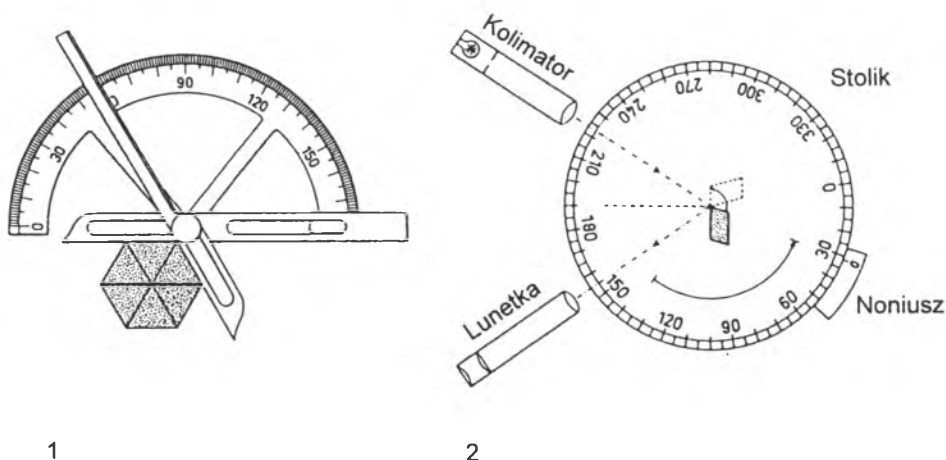
Obserwacje i pomiary elementów ograniczających kryształy doprowadziły do sformułowania prawa stałości kątów (Stensen, 1669). Stwierdza ono, że kryształy tej samej substancji mogą mieć różny wygląd zewnętrzny zależny od liczby i rozmiarów występujących ścian, ale kąty między analogicznymi ścianami tych kryształów pozostają zawsze jednakowe w tych samych warunkach

ciśnienia i temperatury. Inaczej mówiąc, analogiczne ściany różnych obiektów krystalicznych tej samej substancji tworzą ze sobą zawsze jednakowe kąty (rys. 25). Utało się mierzyć kąty pomiędzy ścianami przez pomiar kątów pomiędzy normalnymi tych ścian. Wyniki owych pomiarów bywają pomocne w identyfikacji i odróżnianiu kryształów. Pomiaru dokonuje się za pomocą goniometru (rys. 26).



Rys. 25. Kryształy kwarcu *Q* o różnym wyglądzie zewnętrznym i jednakowym kącie pomiędzy analogicznymi ścianami (wg Ramdohra, Strunza, 1978)

a) widok kryształu z góry, b) widok kryształu z boku



Rys. 26. Pomiar kątów na kryształach (wg Ramdohra, Strunza, 1978)

1 — goniometrem kontaktowym, 2 — goniometrem jednokołowym

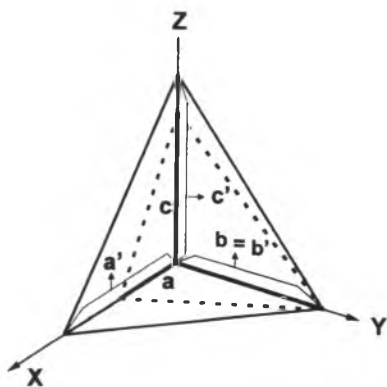
2.3.3. Wskaźniki ścian. Prawo wymiernych stosunków (wskaźników)

Położenie ściany kryształu względem osi krystalograficznych można określić za pomocą odcinanych przez nią na tych osiach odcinków (rys. 27). Jedną ze ścian kryształu, nierównoległą do osi krystalograficznych X , Y , Z , przyjmujemy za ścianę jednostkową, która odcina na tych osiach odpowiednio odcinki (parametry) a , b , c . Jeśli inna odcina na tych osiach odcinki a' , b' , c' , to stosunki:

$$a/a', b/b', c/c'$$

mają się do siebie tak, jak niewielkie liczby całkowite i wynoszą:

$$a/a' : b/b' : c/c' = h : k : l.$$

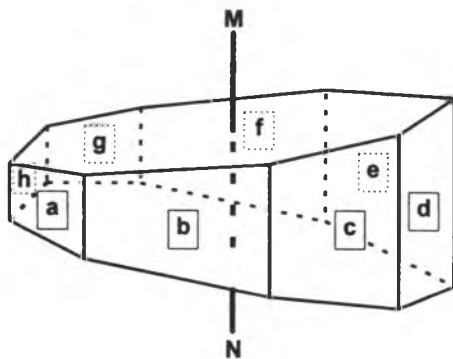


Rys. 27. Położenie ściany kryształu względem osi krystalograficznych (objaśnienia jak na rys. 5) (wg Bolewskiego i in., 1990)

W rezultacie za pomocą trzech takich liczb całkowitych (h, k, l), które nazywane są wskaźnikami ściany (wskaźnikami Millera), można określić położenie każdej ściany kryształu względem osi krystalograficznych. Wskaźniki wszystkich ścian kryształu są liczbami wymiernymi, całkowitymi i prostymi. Stwierdzenie to nazywa się prawem wymiernych stosunków (wskaźników). Wskaźniki ścian ujęte w nawias okrągły z pominięciem znaku dzielenia stanowią symbol ściany, np. (hkl) . Ujęcie wskaźników w nawias klamrowy oznacza symbol postaci prostej, np. $\{hkl\}$.

2.3.4. Prawo pasowe

Pasem nazywany jest zespół ścian kryształu równoległych do jednej i tej samej prostej, która jest osią tego pasa (rys. 28). Wszystkie ściany kryształu pozostają w związku pasowym. Oznacza to, że każda ściana kryształu należy najmniej do

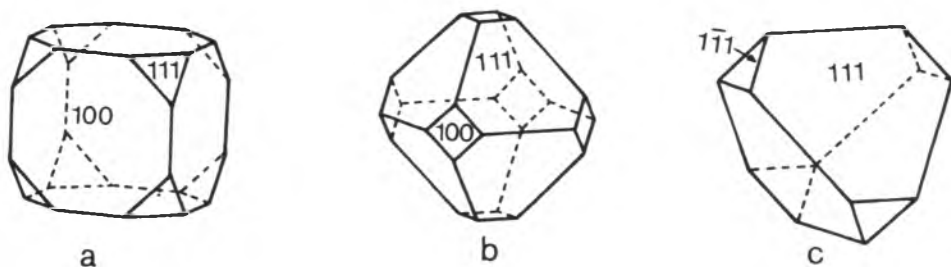


Rys. 28. Pas ścian na kryształ (wg Bolewskiego i in., 1990)
MN — oś pasa, a—h — ściany pasa

dwóch pasów i jest przez nie wyznaczana. Można więc bez pomiaru kątów dedukować z dwu pasów wspólną dla nich płaszczyznę lub z dwu płaszczyzn pas, do którego należą.

2.3.5. Pokrój kryształów (habitus)

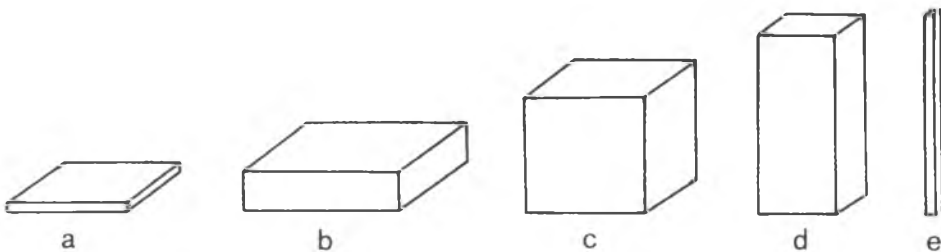
Ogólny zewnętrzny kształt kryształu określa się mianem pokroju. Definiuje się go przez podanie krystalograficznej postaci prostej o najsilniej rozwiniętych ścianach, np. pokrój sześciangu, ośmiościanu, czworościanu (rys. 29, tab. 3), lub przez podanie konturów kryształu, np. pokrój igiełkowy, blaszkowy, słupkowy, tabliczkowy, izometryczny, czyli graniasty (rys. 30). Na kryształach tej samej substancji można obserwować różnorodność pokrojów (rys. 31). Na wygląd kryształów tej samej substancji duży wpływ mają warunki jej powstawania. Prawidłowo wykształcone kryształy, mające prawie wszystkie charakterystyczne dla nich ściany, krawędzie i naroża powstają tylko wtedy, gdy kryształ może swobodnie wzrastać we wszystkich kierunkach (kryształ idiomorficzny). Kryształy, których kształt jest wymuszony warunkami powsta-



Rys. 29. Pokrój kryształu wynikający z najsilniej rozwiniętej krystalograficznej postaci prostej
a — pokrój sześciangu, b — pokrój ośmiościanu, c — pokrój czworościanu

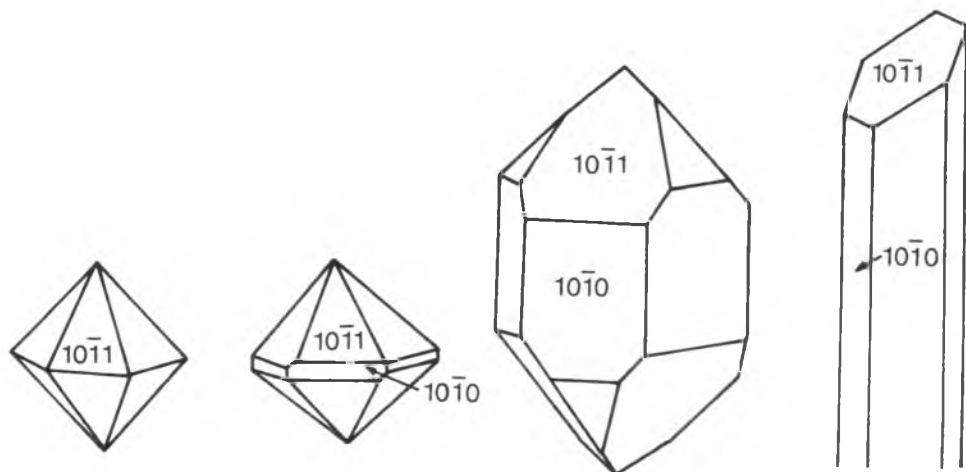
Przykłady pokroju naturalnych materiałów gemmologicznych wynikającego z najsilniej rozwiniętej krystalograficznej postaci prostej

Układ krystalograficzny	Pokrój	Kryształ
Trójskośny	krępego słupa płaskiego słupa	skalenie (amazonit, labrador) rodonit dysten
Jednoskośny	długiego słupa normalnego słupa krępego słupa	spodumen, epidot, diopsyd ortoklaz, gips tytanit, azuryt
Rombowy	długiego słupa rombowego krótkiego słupa rombowego kombinacji słupa rombowego i piramidy rombowej pseudoheksagonalnego słupa	natrolit andaluzyt, topaz, staurolit, danburyt topaz, zoizyt bliźniaki chryzoberylu
Tetragonalny	kombinacji słupa tetragonalnego i piramidy tetragonalnej tetragonalnego słupa spłaszczonego słupa tetragonalnego podwójnej piramidy tetragonalnej	cyrkon, rutyl, skapolit wezuwian wulfenit scheelit, kasyteryt
Trygonalny (romboedryczny)	długiego słupa trygonalnego krótkiego słupa pseudoheksagonalnego spłaszczonego słupa pseudoheksagonalnego romboedru skalenoedru trygonalnego	turmalin kalcyt, korund (szafir), kwarc korund (rubin), diopaz, kwarc kalcyt, rodochrozyt kalcyt
Heksagonalny	długiego słupa heksagonalnego krótkiego słupa heksagonalnego płaskiego słupa heksagonalnego	beryl apatyt, beryl apatyt, beryl (morganit)
Regularny	sześcianu ośmiościanu czworościanu dwunastościanu rombowego dwudziestoczterościanu deltoidowego czterdziestościanu regularnego	fluoryt, galena, piryt diament, spinel, magnetyt sfaleryt granat, piryt, sodalit, azuryt granat, diament diament

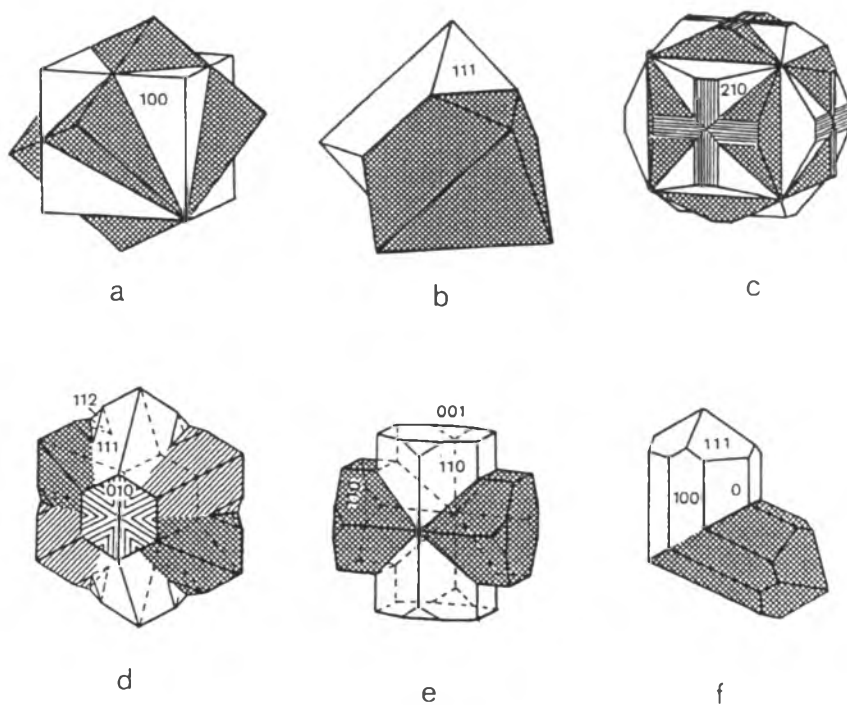


Rys. 30. Pokrój kryształu wynikający z konturu kryształu (wg Maślankiewicz, 1982)

a — blaszkowy, b — tabliczkowy, c — izometryczny (graniasty), d — słupowy, e — igielkowy



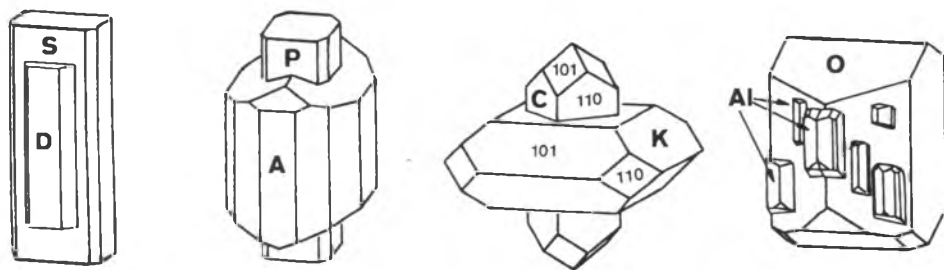
Rys. 31. Pokrój kryształów kwarcu powstałych w różnych warunkach (wg Bolewskiego i in., 1990)



Rys. 32. Charakterystyczne zbliżniaczenia niektórych minerałów (wg Ramdohra, Strunza, 1978)

wania, np. kształtem przestrzeni, w której wzrastał, nazywa się heteromorficznymi, np. gruszka korundu syntetycznego.

Kryształy tej samej substancji tworzą niekiedy prawidłowe zrosty, czyli zbliźniaczenia. Prawidłowość zrostu bliźniaczego polega na ułożeniu osobników wchodzących w skład zbliźniaczenia symetrycznie względem pewnej płaszczyzny (tzw. płaszczyzny bliźniaczej) lub prostej (tzw. osi bliźniaczej). Powierzchnia zetknięcia zbliźnionych kryształów nazywana jest powierzchnią zrostu bliźniaczego. Niektóre typy zbliźniaczeń, właściwe pewnym substancjom krystalicznym, otrzymały nazwę praw bliźniaczych, które podają wskaźniki płaszczyzny lub osi bliźniaczej. Ta sama substancja może tworzyć bliźniaki według kilku, a nawet kilkunastu praw bliźniaczych. Kryształy bliźniacze złożone z dwu osobników nazywa się dwojakami, z trzech — trojakami, a złożone z większej liczby, często nieograniczonej — zbliźnieniami polisyntetycznymi lub wielokrotnymi. Obecność zbliźniaczenia wpływa na wygląd zewnętrzny i bywa pomocna przy identyfikacji substancji krystalicznej (rys. 32). Na bliźniakach występują kąty wklęsłe, których nigdy nie ma na pojedynczych, nie zbliźnionych kryształach. Spotyka się również prawidłowe zrosty kryształów różnych substancji (tzw. epitaksja kryształów). Sądzi się, że powstanie tego rodzaju zrostów jest uwarunkowane istnieniem daleko idących analogii w budowie wewnętrznej tych substancji (rys. 33).



Rys. 33. Epitaksja (prawidłowe zrosty kryształów różnych minerałów) (wg Ramdohra, Strunza, 1978)

D, S — dysten i staurolit, **P, A** — piroksen i amfibol, **C, K** — cyrkon i ksenotym, **O, Al** — ortoklaz i albit

3. Właściwości materiałów gemmologicznych (podstawowe metody identyfikacji)

Identyfikacja materiału gemmologicznego wymaga rozpoznania różnych jego właściwości. Zwykle badanie rozpoczyna się od makroskopowego poznania obiektu (tzw. badanie wstępne, badanie makroskopowe). Badanie to ma duże znaczenie dla wstępnej oceny i selekcji określonej partii materiału gemmologicznego, czyli tzw. lotu. Przeważnie umożliwia ono wypracowanie kryteriów jakościowych dla różnych odmian reprezentowanych w partii materiału i pozwala ustalić optymalne kierunki ich wykorzystania. W trakcie wstępnego badania partii materiału gemmologicznego zwraca się uwagę na:

- wielkość i kształt (pokrój) bryłek, tzn. czy są to pojedyncze kryształy czy różne ich skupiska (szczotki krystaliczne, geody), czy może były lub masywne bloczki,
- obecność prawidłowo wykształconych ścian kryształów,
- stopień przezroczystości,
- barwę i jej zmienność (wadami są: nierównomierne nasycenie, plamistość, strefowość, obecność barw naleciałych, wielobarwność),
- występowanie wad wewnętrznych i zanieczyszczeń, które mogą być defektami powstałymi podczas wzrostu kryształów lub nabytymi później, np. w wyniku zastosowania niewłaściwych metod pozyskania, transportu lub przechowywania.

Badania wstępne stanowią podstawę do programowania zakresu i kolejności angażowania określonych metod badawczych, zwłaszcza instrumentalnych. W pierwszej kolejności angażuje się przeważnie metody proste wymagające użycia nieskomplikowanej aparatury: wagi hydrostatycznej, refraktometru, spektroskopu, dychroskopu i prostych filtrów testujących. Rezultatem tego etapu prac, czyli tzw. badań standardowych jest zazwyczaj identyfikacja obiektu lub materiału gemmologicznego. Niepowodzenie zmusza do sięgnięcia po specjalistyczną aparaturę, np. metody spektrometryczne, laserową mikrosondę ramanowską, fluorescencję rentgenowską. Ten etap można określić mianem

badan specjalnych. Badania wstępne i standardowe są domeną gemmologii klasycznej (podstawowej). Badaniami specjalnymi posługuje się gemmologia nowoczesna (pogłębiona) wykazująca silne związki z fizyką i chemią ciała stałego oraz z inżynierią materiałową. Badania specjalne stosuje się także celem dokładnego rozpoznania właściwości nowych materiałów gemmologicznych. Rezultaty takich badań zazwyczaj są przedmiotem prezentacji w periodykach gemmologicznych.

W doborze metod identyfikacji zasadą jest stosowanie metod nie powodujących destrukcji badanego obiektu (są to tzw. metody nie niszczące), gdyż każdy obiekt gemmologiczny jest potencjalnie unikatowy. Należy również przyjąć jako zasadę, że każdy obiekt unikatowy powinien być badany i oceniany indywidualnie. Tylko wyjątkowo dopuszcza się stosowanie procedur powodujących pewien, możliwie nieznaczny uszczerbek badanego obiektu, np. test twardości, test chemiczny. Upoważnieniem dla zastosowania takiej metody może być wielkość i sposób instalacji obiektu (np. duża, trwale wmontowana rzeźba lub płaskorzeźba) utrudniający lub nawet uniemożliwiający zastosowanie jednej z nie niszczących metod laboratoryjnych.

3.1. Gęstość właściwa

Stosunek ciężaru jednorodnego ciała odniesiony do jego objętości nazywany jest ciężarem właściwym:

$$\gamma = G/V \text{ [g/cm}^3\text{]},$$

gdzie:

- γ — ciężar właściwy,
- G — ciężar ciała,
- V — objętość ciała.

Gęstość jest masą jednostki objętości jednorodnego ciała:

$$\mu = m/V \text{ [g/cm}^3\text{]},$$

gdzie:

- μ — gęstość,
- m — masa ciała,
- V — jednostka objętości.

Dla celów gemmologicznych chętniej używa się pojęcia gęstości właściwej. Jest to stosunek masy pewnej objętości ciała jednorodnego do masy tej samej objętości wody o temperaturze 4°C (woda ma w tej temperaturze największą gęstość) i w normalnym ciśnieniu atmosferycznym:

$$\mu_R = m_C/m_{H_2O},$$

gdzie:

- μ_R — gęstość właściwa,
- m_C — masa jednostki objętości jednorodnego ciała,
- m_{H_2O} — masa takiej samej objętości wody.

Ciężar ciała to siła, z jaką ciśnie ono na podporę pod wpływem siły grawitacji:

$$G = k m g,$$

gdzie:

- G — ciężar ciała,
- k — współczynnik proporcjonalności,
- m — masa ciała,
- g — przyspieszenie ziemskie.

Masa pewnej jednostki objętości wody (np. 1 cm^3) będzie zatem wynosiła:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = G_{\text{H}_2\text{O}}/k g,$$

a masa takiej samej jednostki objętości pewnego jednorodnego ciała odpowiednio:

$$m_c = G_c/k g.$$

W rezultacie jego gęstość właściwa będzie mogła być wyrażona przez stosunek ciężarów takich samych objętości badanego ciała i wody:

$$\mu_R = G_c/G_{\text{H}_2\text{O}},$$

gdzie:

- μ_R — gęstość właściwa,
- G_c — ciężar pewnej objętości ciała jednorodnego,
- $G_{\text{H}_2\text{O}}$ — ciężar takiej samej objętości wody.

Otrzymana liczba jest niemianowana. Na przykład gęstość właściwa diamentu wynosi 3,52. Oznacza to, że pewna objętość diamentu waży w warunkach panujących na powierzchni Ziemi 3,52 razy więcej niż ta sama objętość wody (w tych warunkach gęstość wody wynosi $1,0 \text{ g/cm}^3$).

Gęstość właściwa jest jedną z podstawowych cech identyfikacyjnych materiałów gemmologicznych, zwłaszcza nieprzezroczystych i przeświecających. Wiele z nich ma tę cechę bardzo ustabilizowaną. Dotyczy to zwłaszcza materiałów syntetycznych oraz materiałów o prostym składzie chemicznym, jak diament, korund czy kwarc. Częste odchylenia od standardowej gęstości właściwej świadczą o obecności domieszek lub o złożonym, zmieniającym się w pewnych granicach, składzie chemicznym (np. granaty). Na odchylenia od standardowej gęstości właściwej może mieć wpływ również destrukcja sieci krystalicznej materiału, np. spowodowana produktami samorzutnego rozpadu pierwiastków promieniotwórczych wbudowanych uprzednio w sieć krystaliczną materiału (np. cyrkon zawierający atomy uranu). Jednak odchylenia od standardowej gęstości właściwej nie są wielkie i przeważnie mieszczą się w stosunkowo wąskich granicach.

Gęstość właściwa większości najcenniejszych materiałów gemmologicznych jest wyraźnie większa od gęstości właściwej pospolitych składników skorupy ziemskiej, mieszcząc się w przedziale 2,7—4,7 (tab. 4).

Gęstość właściwa wybranych materiałów gemmologicznych

GGG	7,02 ($\pm 0,30$)
Kasyteryt	6,95 ($\pm 0,70$)
Scheelit	6,12
Cyrkon	5,80 ($\pm 0,20$)
Cynkit	5,70
Hematyt	5,20 ($\pm 0,80$)
Fabulit	5,13 ($\pm 0,20$)
Piryt	5,00 ($\pm 0,10$)
Markasyt	4,85 ($\pm 0,05$)
Cyrkon (wysoki)	4,70 ($\pm 0,03$)
Cyrkon (średni)	4,32 ($\pm 0,25$)
Gahnit	4,55
YAG	4,55
Smitsonit	4,30 ($\pm 0,10$)
Rutyl (nat. i synt.)	4,26 ($\pm 0,20$)
Spessartyn	4,15 ($\pm 0,30$)
Ganospinel	4,01 ($\pm 0,40$)
Cyrkon (niski)	4,00 ($\pm 0,07$)
Korund (nat. i synt.)	4,00 ($\pm 0,30$)
Malachit	3,95—3,70 ($\pm 0,15$)
Anataz	3,90
Andradyt	3,84 ($\pm 0,30$)
Rodolit	3,84 ($\pm 0,10$)
Azuryt	3,80—3,50 ($\pm 0,70$)
Pirop	3,78—3,16 ($\pm 0,90$)
Chryzoberyl	3,73 ($\pm 0,02$)
Chryzoberyl synt.	3,71 ($\pm 0,02$)
Staurolit	3,71 ($\pm 0,06$)
Rodochrozyt	3,70
Spinel synt.	3,64—3,12 ($\pm 0,02$)
Benitoit	3,64 ($\pm 0,03$)
Dysten	3,62 ($\pm 0,06$)
Grossular	3,61—3,27 ($\pm 0,12$)
Taaffeit	3,61
Spinel	3,60—3,03 ($\pm 0,30$)
Topaz	3,53 ($\pm 0,04$)
Diament	3,52 ($\pm 0,01$)
Tytanit	3,52 ($\pm 0,02$)
Rodonit	3,50 ($\pm 0,20$)
Sinhalit	3,48

Epidot	3,40 ($\pm 0,08$)
Oliwin	3,34—3,03 ($\pm 0,14$)
Jadeit	3,34 ($\pm 0,04$)
Zoizyt	3,30 ($\pm 0,10$)
Diopfaz	3,30 ($\pm 0,05$)
Ekanit	3,28
Enstatyt	3,25 ($\pm 0,02$)
Sylimanit	3,25 ($\pm 0,02$)
Fluoryt	3,18 ($\pm 0,01$)
Apatyt	3,18 ($\pm 0,02$)
Spodumen	3,18 ($\pm 0,03$)
Andaluzyt	3,17 ($\pm 0,04$)
Euklaz	3,10 ($\pm 0,01$)
Odontolit	3,10
Lazulit	3,09 ($\pm 0,05$)
Turmalin	3,06—3,05 ($\pm 0,15$)
Amblygonit	3,02
Danburyt	3,00 ($\pm 0,01$)
Nefryt	2,95 ($\pm 0,05$)
Konchiolina	2,85
Agalmatolit	2,80
Turkus	2,76—2,45 ($\pm 0,08$)
Beryl	2,72—2,05 ($\pm 0,12$)
Perła	2,70—2,02 ($\pm 0,15$)
Labratoryt	2,70 ($\pm 0,05$)
Kalcyt	2,70
Beryl synt.	2,68—2,66 ($\pm 0,02$)
Kwarc (nat. i synt.)	2,66 ($\pm 0,01$)
Turkus synt.	2,66
Albit	2,65 ($\pm 0,02$)
Koral	2,65 ($\pm 0,05$)
Kordieryt (iolit)	2,61 ($\pm 0,05$)
Chalcedon	2,60 ($\pm 0,05$)
Ortoklaz	2,56 ($\pm 0,01$)
Tektyt (moldawit)	2,40 ($\pm 0,04$)
Szkoło	2,30—4,50
Opal	2,15—1,90 ($\pm 0,08$)
Gagat	1,32 ($\pm 0,02$)
Plastik	1,30 ($\pm 0,25$)
Bursztyn	1,08 ($\pm 0,02$)

3.1.1. Pomiar gęstości właściwej

Do wyznaczania gęstości właściwej materiałów gemmologicznych na ogół stosuje się następujące metody.

a. Metoda wagi hydrostatycznej

Wykorzystując prawo Archimedesesa można stwierdzić, że:

$$\mu_R = G_p / (G_p - G_w),$$

gdzie:

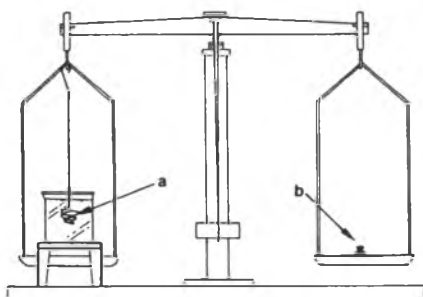
- μ_R — gęstość właściwa,
- G_p — ciężar ciała w powietrzu,
- G_w — ciężar ciała w wodzie.

Żeby określić ciężar ciała zanurzonego w wodzie, wystarczy zmodyfikować nieco zwykłą wagę tak, aby można było ustawić ponad jedną z szalek naczynie z wodą destylowaną (rys. 34). Dla określenia gęstości właściwej dowolnego obiektu należy:

- zważyć go w zwykły sposób w powietrzu (G_p),
- zainstalować pojemnik z wodą,
- zawiesić drut zakończony spiralką zwiniętą w kształt koszyczka, w którym umieszcza się ważony obiekt (B_1); do tego celu należy używać możliwie cienkiego drutu, np. $\varnothing 0,1$ mm,
- wyjąć ważony obiekt z koszyczka i ponownie zważyć sam drut zakończony spiralką (B_2); z różnicy $B_1 - B_2$ uzyskany zostanie ciężar obiektu zanurzonego w wodzie (G_w),
- obliczyć gęstość właściwą obiektu w myśl formuły:

$$\mu_R = G_p / (G_p - G_w).$$

Podczas wykonywania pomiaru należy zwrócić uwagę, by do spiralki i badanego obiektu nie przywarły pęcherzyki powietrza. Zapobiega temu dodanie do wody destylowanej kropli detergentu lub użycie cieczy o mniejszym



Rys. 34. Waga hydrostatyczna (a — spiralka, b — ciężarek równoważący ciężar spiralki)

napięciu powierzchniowym. W obliczeniach należy wówczas uwzględnić zmienioną gęstość użytej cieczy. Dla bardzo małych ciał pomiar gęstości właściwej wykonywany metodą wagi hydrostatycznej nie jest precyzyjny. Dlatego zaleca się stosowanie go w obiektach o wadze powyżej 1 karata (0,2 g).

b. Metoda cieczy ciężkich

Polega ona na wykorzystaniu cieczy o znanej gęstości właściwej. Jeżeli obiekt ma gęstość właściwą mniejszą od cieczy, to utrzymuje się na jej powierzchni. Jeżeli jego gęstość właściwa jest równa gęstości właściwej cieczy, to obiekt pozostaje w niej swobodnie zawieszony. Jeśli jego gęstość właściwa jest większa od gęstości cieczy, to obiekt w niej tonie. Mieszając w określonych proporcjach cieczy o różnej gęstości właściwej lub dobierając ciecz o odpowiedniej gęstości właściwej, można doprowadzić do zrównania gęstości właściwej cieczy z gęstością właściwą zanurzanego w nich ciała.

W badaniach gemmologicznych najczęściej używa się bromoformu (CHBr_3 — gęstość właściwa 2,88), jodku metylenu (CH_2J_2 — gęstość właściwa 3,31) oraz cieczy de Clérici (sole talu: $\text{CH}_2(\text{COOTl})_2 + \text{HCOOTl}$ — gęstość właściwa około 4, bo zależy od proporcji tych soli). Bromoform i jodek metylenu są związkami organicznymi i mogą być rozcieńczane bromonaftalenem, toluenem lub benzenem. Gęstość właściwą cieczy de Clérici można zmniejszać dodatkiem wody destylowanej. Ciecze ciężkie powinny być chronione przed oddziaływaniem światła (reakcja fotochemiczna) oraz parowaniem (zamykanie w szczelnych naczyniach). Dodatek niewielkiego kawałka miedzi lub pastylki KOH do jodku metylenu wiąże wolny jod i chroni ciecz przed ciemnieniem z powodu wydzielania się jodu.

Rzadziej stosowanymi cieczami ciężkimi są: ciecz Thouleta ($\text{HgJ}_2 + \text{KJ}$ — gęstość właściwa 3,17), ciecz Kleina ($9\text{WO}_3\text{B}_2\text{O}_3 + 2\text{Cd}(\text{OH})_2 + 16\text{H}_2\text{O}$ — gęstość właściwa 3,36) oraz czterobromek acetyleny ($\text{CHBr}_2\cdot\text{CBr}_2$ — gęstość właściwa 3,01 — rozcieńczany benzenem lub toluenem).

Dla obliczenia ilości cieczy ciężkiej i rozpuszczalnika potrzebnych do sporządzenia cieczy o pożądanej gęstości stosuje się algorytm:

$$d = (V_1Q_1 + V_2Q_2)/(V_1 + V_2),$$

gdzie:

- d — gęstość cieczy otrzymanej przez wymieszanie z rozpuszczalnikiem,
- V_1 — objętość cieczy ciężkiej,
- V_2 — objętość rozpuszczalnika,
- Q_1 — gęstość cieczy,
- Q_2 — gęstość rozpuszczalnika.

B. W. Anderson (1980) proponuje użytkowanie następującego zestawu cieczy ciężkich:

1. Bromoform rozcieńczony bromonaftalenem do gęstości właściwej 2,65 (jako wskaźnika gęstości właściwej, czyli tzw. *indykatora gęstości*, używa się kawałka kwarcu — kryształu górskiego; indykatorami gęstości nazywa się minerały o względnie stałej gęstości właściwej służące do kalibrowania gęstości właściwej cieczy ciężkich).

2. Bromoform rozcieńczony do gęstości właściwej 2,71 (wskaźnik gęstości właściwej — kalcyt).

3. Jodek metylenu rozcieńczony bromonaftalenem do gęstości właściwej 3,06 (wskaźnik gęstości właściwej — zielony turmalin).

4. Jodek metylenu nie rozcieńczony — gęstość właściwa 3,32 (wskaźnik gęstości właściwej — jadeit).

5. Ciecz de Clérici rozcieńczona wodą do gęstości właściwej 3,52 (wskaźnik gęstości właściwej — diament).

6. Ciecz de Clérici rozcieńczona wodą do gęstości właściwej 4,0 (wskaźnikiem gęstości właściwej jest syntetyczny korund — rubin).

Wskaźniki gęstości powinny pozostawać stale w cieczy ciężkiej, by zawsze można było mieć pewność, że nie zmienił się ich stan rozcieńczenia, np. wskutek parowania, czy przez dostanie się resztek cieczy używanej do płukania badanych obiektów.

Z uwagi na silną toksyczność cieczy de Clérici i bromoformu obecnie chętniej korzysta się z zestawu cieczy ciężkich uzyskiwanych przez rozcieńczenie jodku metylenu. W skład zestawu wchodzi ciecze o następujących stężeniach:

1. Jodek metylenu rozcieńczony do gęstości właściwej 2,57 (wskaźniki gęstości właściwej — mikroklin 2,56 i chalcedon 2,60).

2. Jodek metylenu rozcieńczony do gęstości właściwej 2,62 (wskaźniki gęstości właściwej — chalcedon 2,60; kwarc 2,65).

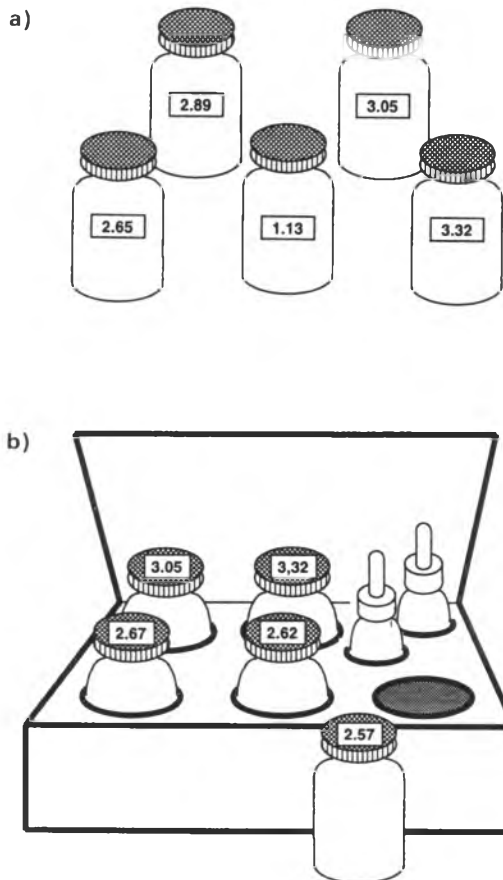
3. Jodek metylenu rozcieńczony do gęstości właściwej 2,67 (wskaźniki gęstości właściwej — syntetyczny beryl 2,66; kalcyt 2,70).

4. Jodek metylenu rozcieńczony do gęstości właściwej 2,85 (wskaźnik gęstości właściwej — nefryt 2,95).

5. Jodek metylenu rozcieńczony do gęstości właściwej 3,05 (wskaźnik gęstości właściwej — turmalin 3,04).

6. Jodek metylenu czysty o gęstości właściwej 3,32 (wskaźnik gęstości właściwej — jadeit 3,34).

W takim zestawie bywa umieszczany również roztwór wodny soli kuchennej o gęstości właściwej 1,12—1,14 (około 10 łyżeczek soli kuchennej na szklanę wody). W takim roztworze bursztyn pływa (gęstość właściwa ~ 1,08), podczas gdy większość jego imitacji tonie (np. pleksiglas). Tylko kopal (gęstość właściwa ~ 1,06) i niektóre lekkie tworzywa sztuczne (np. polistyren, gęstość właściwa ~ 1,05) nie toną. W obrocie handlowym znajdują się zestawy cieczy ciężkich



Rys. 35. Najczęściej używane zestawy cieczy ciężkich

a) zawierający roztwór soli kuchennej (gęstość 1,13) i roztwory w różnym stopniu rozcieńczonego jodku metylenu (2,65; 2,89; 3,05; 3,32). b) zawierający różnie rozcieńczony jodek metylenu (2,57; 2,62; 2,67; 3,05; 3,32)

Dużą zaletą metody cieczy ciężkich jest możliwość badania gęstości właściwej wielu obiektów (egzemplarzy) jednocześnie. Jednak wykonywany tym sposobem pomiar nie jest zbyt precyzyjny, a raczej orientacyjny. Nie bez znaczenia jest także wyższa cena pomiaru jednostkowego wykonanego metodą cieczy ciężkich w porównaniu z ceną pomiaru jednostkowego wykonanego metodą wagi hydrostatycznej.

Istnieją dwa warianty metody cieczy ciężkich. Polegają one na:

- a) porównywaniu gęstości właściwej badanego obiektu z gęstością właściwą roztworu, w którym jest on:
 - zanurzany kolejno w coraz to innych porcjach cieczy ciężkiej różniących się gęstością właściwą,
 - utrzymywany podczas stopniowego rozcieńczania roztworu, kropla po kropli, aż do osiągnięcia swobodnego zawisnięcia w roztworze; osiągniętą w tym momencie gęstość właściwą roztworu cieczy ciężkiej mierzy się metodą klasyczną;

b) określeniu gęstości właściwej badanego ciała w kolumnie cieczy z gradientem gęstości właściwej, w której badane ciało zawisa na wysokości odpowiadającej jego gęstości właściwej.

Zwykle nie zaleca się testowania cieczami ciężkimi materiałów porowatych, np. opalu, turkus. Obiekt poddany badaniu w cieczach ciężkich powinien być po każdej fazie badania starannie oplukany, by w następnej fazie uniknąć zanieczyszczenia kolejnego roztworu. Do oczyszczenia obiektu z jodku metylenu najczęściej używa się alkoholu etylowego lub benzenu. Metodą cieczy ciężkich mogą być skutecznie testowane także obiekty małe — np. o wadze mniejszej od 1 karata (0,2 g).

c. Piknometr

Najprostszy piknometr to szklane naczynie o ujściu dokładnie zamykanym specjalnym korkiem umożliwiającym odpływ nadmiaru cieczy (rys. 36). Piknometryczny pomiar gęstości właściwej polega na:

- dokładnym ważeniu oznaczanego obiektu (Q_c),
- dokładnym ważeniu piknometru napełnionego wodą (Q_p),
- włożeniu oznaczanego obiektu do piknometru,
- usunięciu nadmiaru wody,
- zamknięciu korkiem piknometru,
- dokładnym ważeniu piknometru wraz z wodą i oznaczanym obiektem (Q_{pc}),
- obliczeniu gęstości właściwej obiektu w myśl formuły:

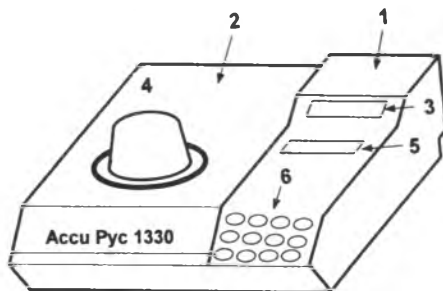
$$\mu_R = (Q_p + Q_c - Q_{pc})/Q_c,$$

gdzie:

- μ_R — gęstość właściwa,
- Q_c — ciężar oznaczanego obiektu,
- Q_p — ciężar piknometru napełnionego wodą,
- Q_{pc} — ciężar piknometru napełnionego wodą wraz z oznaczanym obiektem.



Rys. 36. Piknometr



Rys. 37. Piknometr „ACCUPYC 1330”

- 1 — przedział elektroniczny, 2 — przedział pomiarowy, 3 — odczyt wyniku pomiaru, 4 — pokrywa komory pomiarowej, 5 — tablica synoptyczna, 6 — klawiatura

Współczesne piknometry są urządzeniami bardziej skomplikowanymi. Przykładem może być piknometr „ACCUPYC 1330”, który pozwala ustalić gęstość właściwą obiektu przez pomiar zmiany ciśnienia helu zawartego w komorze pomiarowej (rys. 37). Aparatem tym można mierzyć obiekty o objętości nie przekraczającej 1 cm^3 lub po zmianie komory pomiarowej na większą — do 10 cm^3 . Czas pomiaru jednego obiektu takim aparatem wynosi średnio 25 min, podczas gdy przy użyciu cieczy ciężkich nie przekracza on 2 min, a wagą hydrostatyczną 15 min. Z zastosowaniem nowoczesnego piknometru można precyzyjnie oznaczać gęstość właściwą obiektów o wielkości do około 0,5 karata (0,1 g). Obiekty mniejsze mają już błąd pomiaru większy od $\pm 0,01\text{ g}$.

3.2. Twardość

Badanie twardości materiałów gemmologicznych odbywa się raczej wyjątkowo. Wynika to z potencjalnie uszkadzającego charakteru takiego badania. Ponadto większość najcenniejszych materiałów gemmologicznych ma podobną twardość i właściwość ta jest mało skutecznym sposobem ich rozróżniania. Badanie twardości to przydatny sposób badania właściwości fizycznych materiałów, z których wykonano wielkogabarytowe obiekty (np. rzeźby, elementy architektoniczne) lub będące dużymi bryłami nie obrobionego surowca. Badanie twardości bywa stosowane również w identyfikacji i ocenie diamentów, gdyż są to jedyne obiekty, które nie powinny ulec uszkodzeniu podczas takiego testowania.

W gemmologii mianem twardości określa się odporność materiału na oddziaływanie najtwardszego składnika kurzu, czyli drobnych cząstek kwarcu stale unoszących się w powietrzu. Będąc stale obecne, oddziałują abrazyjnie na wszystkie materiały. Na ich działanie odporne są tylko materiały twardsze od kwarcu, jak korund czy diament.

Twardość definiowana jest także jako odporność materiału na abrazję polegającą na zarysowaniu jego powierzchni zaostrzonym narzędziem wyposażonym w końcówkę o większej twardości lub jako odporność na ścieranie innym materiałem.

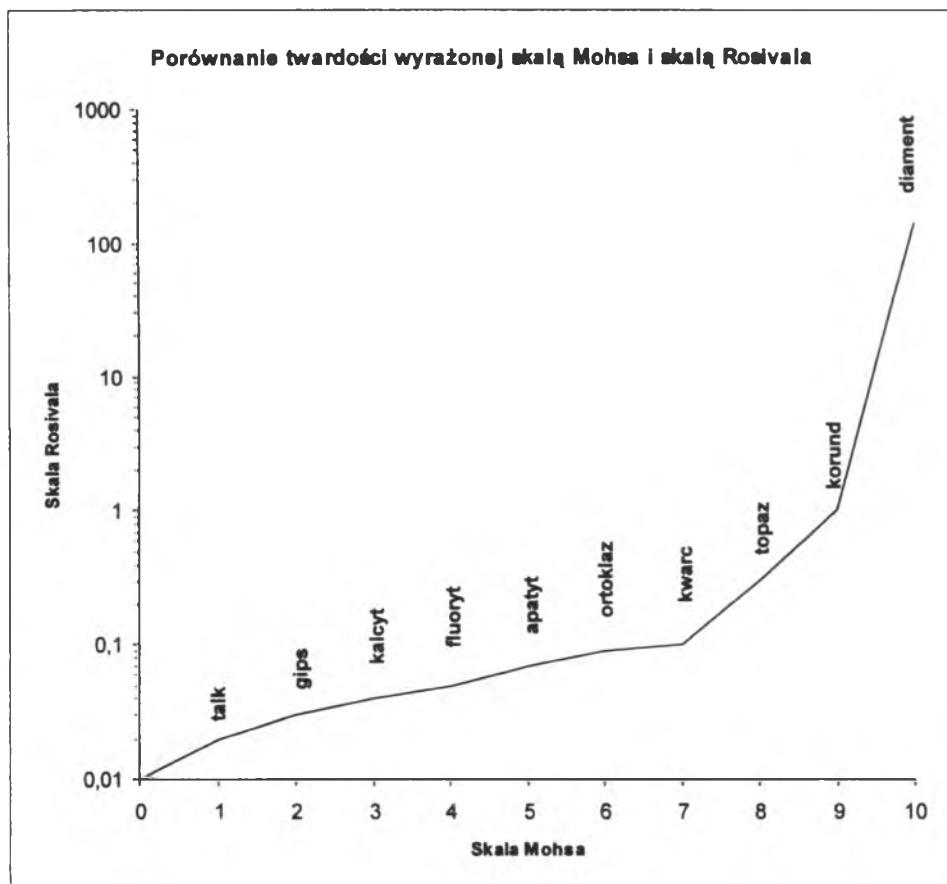
3.2.1. Skale twardości używane w gemmologii

Dla określenia twardości materiałów gemmologicznych używa się skal twardości (tab. 5):

- Jakościowej (tzw. skali Mohsa), która opiera się na tym, że minerały znajdujące się niżej na skali są zarysowywane przez minerały umieszczone wyżej na skali. Minerały o podobnej twardości rysują się wzajemnie.

Porównanie skal twardości Mohsa i Rosivala

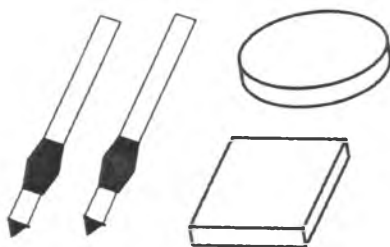
Skala Mohsa (1822)	Orientacyjny test twardości	Skala Rosivala (1896)
1. Talk	daje się zarysować zapalką	0,03
2. Gips	daje się zarysować paznokciem	1,04
3. Kalcyt	łatwo rysuje się drutem miedzianym	3,75
4. Fluoryt	łatwo rysuje się ostrzem szczyryka	4,20
5. Apatyt	rysuje się ostrzem szczyryka	5,40
6. Ortoklaz	daje się rysować ostrzem stalowym	30,80
7. Kwarc	rysuje szkło okienne	100,0
8. Topaz	rysuje kwarc	146,0
9. Korund	daje się zarysować diamentem	833,0
10. Diament	nie daje się zarysować korundem	117 000,0



- Ilościowej (tzw. skala Rosivala), która opiera się na ilościowym określeniu zdolności abrazyjnej minerałów występujących w skali Mohsa. Jako materiału szlifującego używa się proszku korundowego lub diamentowego. Z porównania obu skal twardości wynika (rys. 38), że skala Mohsa jest skalą względną i nieliniową.

3.2.2. Gemmologiczne testy twardości

W ofercie handlowej występują specjalne ołówki i płytki do testowania twardości (rys. 39). Ołówki są wyposażone w końcówki wykonane z kryształów o znanej twardości (najczęściej są to minerały wzorcowe skali Mohsa). Ich użytkowanie, polegające na próbie zarysowania powierzchni testowanego



Rys. 39. Ołówki i płytki do testowania twardości materiałów gemmologicznych

materiału, nie jest zbyt polecane. Wydaje się, że lepszym sposobem jest użycie płytek wykonanych z materiału o znanej twardości. W tym przypadku testowanie twardości polega na próbie zarysowania płytki testującej za pomocą testowanego obiektu. Badanie rozpoczyna się od płytek o najmniejszej twardości. Ślad pozostawiony na płytce testującej często oceniany jest lupą.

Twardość najcenniejszych materiałów gemmologicznych przekracza przeważnie 5—7 według skali Mohsa (tab. 6).

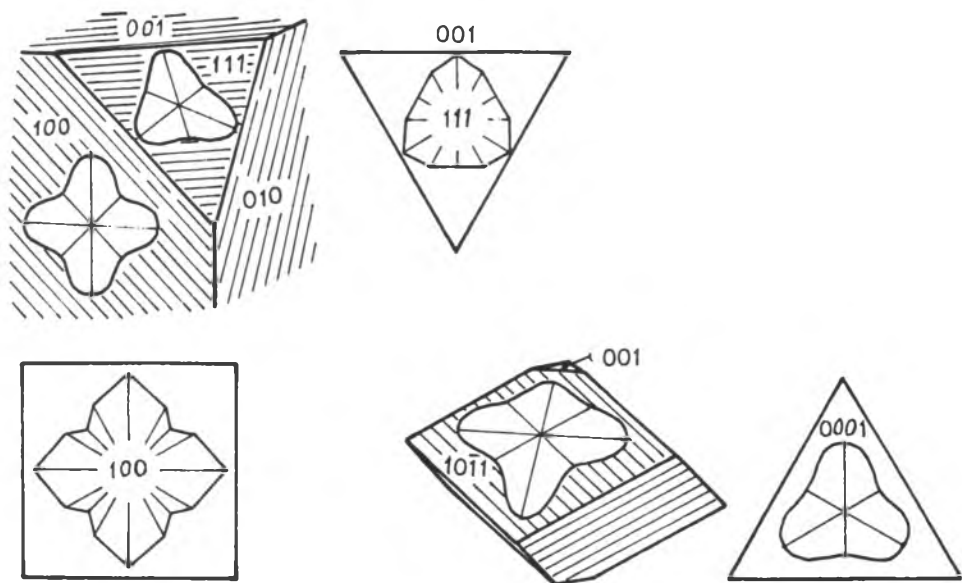
3.2.3. Twardość jako cecha anizotropowa kryształu

Twardość jest własnością anizotropową, czyli zależną od kierunku (rys. 40). Jednak różnice twardości na ścianach kryształów tej samej substancji krystalicznej są na tyle nieduże, że zwykle się je pomija. Mogą one mieć jednak pewne znaczenie praktyczne np. przy polerowaniu diamentu (rys. 41). Tylko niektóre kryształy wykazują znaczniejsze różnice twardości. Przykładem może być dysten (cyjanit), którego twardość silnie zależy od ściany i kierunku wykonywania rysy (rys. 42):

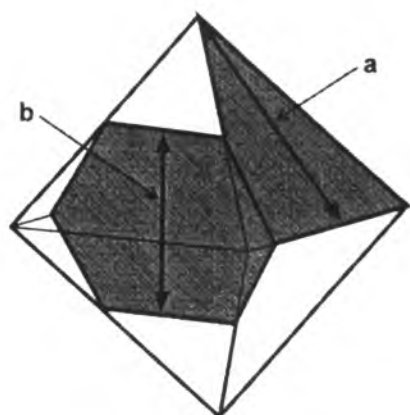
Twardość wybranych materiałów gemmologicznych (wg skali Mohsa)

Diament	10,0
Korund (nat. i synt.)	9,0
Chryzoberyl	8,5
Cyrkon	8,5
YAG	8,25
Spinel (nat. i synt.)	8,0
Topaz	8,0
Taaffeit	8,0
Beryl (nat. i synt.)	7,5–8,0
Fenakit	7,5–8,0
Ganospinel	7,5–8,0
Cyrkon (wysoki)	7,5
Cyrkon (średni)	7,5
Almandyn	7,5
Euklaz	7,5
Pirop	7,0–7,5
Spessartyn	7,0–7,5
Turmalin	7,0–7,5
Andaluzyt	7,0–7,5
Kordieryt (iolit)	7,0–7,5
Staurolit	7,0–7,5
Grossular	7,0
Kwarc (nat. i synt.)	7,0
Danburyt	7,0
Chalcedon	6,5–7,0
Oliwin	6,5–7,0
Jadeit	6,5–7,0
Andradyt	6,5–7,0
Wezuwian	6,5
Skapolit	6,5
Kornerupin	6,5
Cyrkon (niski)	6,5
GGG	6,5
Spodumen	6,0–7,0
Sinhalit	6,0–7,0
Epidot	6,0–7,0
Sylimanit	6,0–7,0
Rutyl (nat. i synt.)	6,0–6,5
Mikroklin	6,0–6,5
Albit	6,0–6,5
Ortoklaz	6,0–6,5
Nefryt	6,0–6,5
Piryt	6,0–6,5

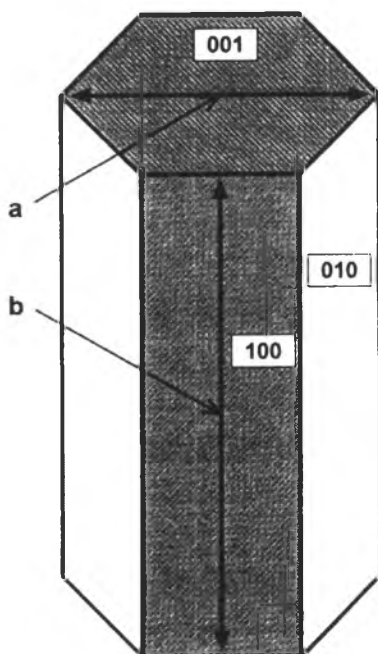
Benitoit	6,0–6,5
Labratoryt	6,0
Hematyt	5,5–6,5
Rodonit	5,5–6,5
Anataz	5,5–6,0
Enstatyt	5,5
Tektyt (moldawit)	5,5
Opal	5,5
Diopsyd	5,0–6,0
Szkło	5,0–6,0
Fabulit	5,0–6,0
Lazulit	5,0–6,0
Lazuryt	5,0–6,0
Turkus	5,0–6,0
Sodalit	5,0–6,0
Tytanit	5,0–5,5
Obsydian	5,0–5,5
Apatyt	5,0
Scheelit	5,0
Diopfaz	5,0
Smitsonit	5,0
Odontolit	5,0
Turkus (synt.)	5,0
Opal (synt.)	4,5
Cynkit	4,5
Dysten	4,0–7,0
Fluoryt	4,0
Rodochozyt	3,5–4,5
Malachit	3,5–4,0
Azuryt	3,5–4,0
Sfaleryt	3,5–4,0
Koral	3,5–4,0
Konchiolina	3,5
Kalcyt	3,0
Perła	2,5–4,5
Gagat	2,5–4,0
Agalmatolit	2,5
Serpentyn	2,0–4,0
Bursztyn	2,0–2,5
Kopal (bursztyn z Dominikany)	2,0
Gips	2,0
Steatyt	1,0–2,5



Rys. 40. Anizotropia twardości kryształów (fluoryt — z lewej, kalcyt — z prawej) (wg Bolewskiego i in., 1990)



Rys. 41. Różnica twardości kryształu diamentu na ścianach ośmiościanu (a) i dwunastościanu rombowego (b) (wg Bolewskiego i in., 1990)



Rys. 42. Różnica twardości kryształu dystenu na ścianach dwuścianu podstawowego (a) i ścianach słupa (b) (wg Bolewskiego i in., 1990)

- na ścianie dwuscianu podstawowego (001) II $Y = 5,5$ według skali Mohsa,
- na ścianie dwuscianu podstawowego (001) II $X = 6,5$ według skali Mohsa,
- na ścianie (010) słupa II $Z = 6,0$ według skali Mohsa,
- na ścianie (010) słupa \perp $Z = 7,0$ według skali Mohsa,
- na ścianie (100) słupa II $Z = 4,5\text{—}5,0$ według skali Mohsa,
- na ścianie (100) słupa II $Y = 6,0\text{—}7,0$ według skali Mohsa.

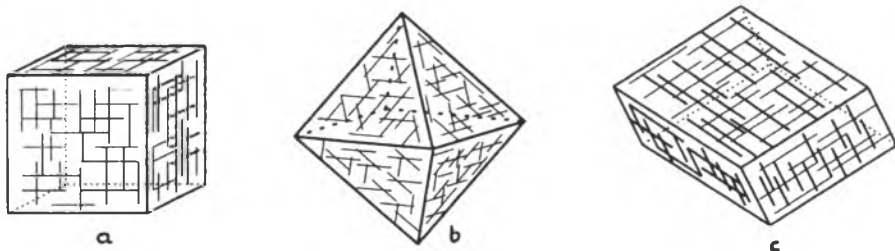
3.3. Łupliwość i przełam

Kryształ mający zdolność do dzielenia się według płaskich powierzchni (płaszczyzn łupliwości) wykazuje łupliwość. Gdy powierzchnia podziału jest nierówna, mamy do czynienia z przełamem. Istnieją również kryształy nie wykazujące łupliwości — np. kwarc.

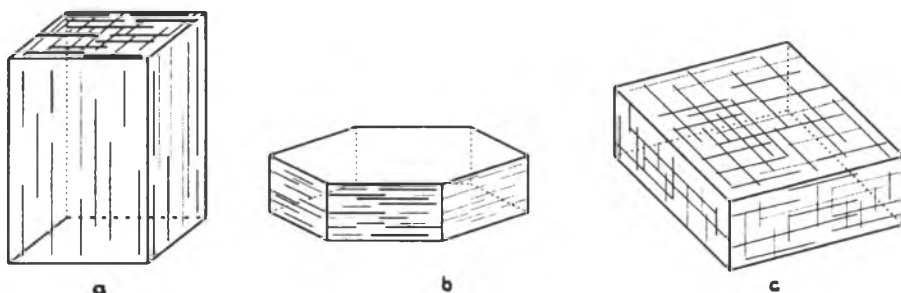
Łupliwość jest charakterystyczną właściwością poszczególnych materiałów krystalicznych i stanowi ich ważną cechę diagnostyczną (tab. 7). W niektórych kryształach spójność w pewnych kierunkach jest dużo mniejsza niż w innych, co prowadzi do tego, że mogą one dość łatwo dzielić się według tych kierunków. Żeby opisać to zjawisko, mówi się o łupliwości:

- kubicznej, oktaedrycznej, romboedrycznej,
- słupowej, blaszkowej, bazalnej (podstawowej) (rys. 43).

1



2



Rys. 43. Łupliwość kryształów (wg Ramdohra, Strunza, 1978)

1a — kubiczna (np. spinel syntetyczny), **1b** — oktaedryczna (np. diament, fluoryt), **1c** — romboedryczna (np. kalcyt), **2a** — słupowa (np. spodumen), **2b** — blaszkowa (np. mika), **2c** — bazalna (np. topaz)

Łupliwość i przełam wybranych materiałów gemmologicznych

Jednokierunkowa	
Euklaz	doskonała
Sylimanit	doskonała
Epidot	doskonała
Topaz	doskonała
Kordieryt	wyróżnialna
Dwukierunkowa	
Beryllonit	jeden kierunek — doskonała; drugi kierunek — prawie doskonała; kąt przecięcia — 90°
Brazylianit	doskonała
Diopsyd	doskonała; kąt przecięcia — $92,5^\circ$
Enstatyt	doskonała; kąt przecięcia — 88°
Skaleń (ortoklaz, mikroklin, albit — anortyt)	jeden kierunek — doskonała; drugi kierunek — mniej doskonała; kąt przecięcia — od 90° do 86°
Jadeit	doskonała; kąt przecięcia — 93°
Kornerupin	doskonała
Dysten	jeden kierunek — doskonała; drugi kierunek — wyróżnialna; kąt przecięcia — 74°
Tytanit	wyróżnialna
Spodumen	doskonała; kąt przecięcia — 93°
Trzykierunkowa	
Kalcyt	doskonała (romboedryczna)
Diopfaz	doskonała (romboedryczna)
Smitsonit	doskonała (romboedryczna)
Czterokierunkowa	
Korund	wyróżnialna podzielność
Diaament	doskonała (oktaedryczna)
Fluoryt	doskonała (oktaedryczna)
Sześciokierunkowa	
Sodalit	wyróżnialna
Sfaleryt	doskonała (dodekaedryczna)

Charakterystyczna łupliwość kryształów (przykłady)

Układ krystalograficzny	Rozmieszczenie płaszczyzn łupliwości (według ścian postaci)	Przykłady z wskazaniem najwyraźniejszej płaszczyzny łupliwości
Trójskośny	dwuścianu	dysten (100)
Jednoskośny	dwuścianu, słupa	ortoklaz (010), (001); kunzyt (110)
Rombowy	dwuścianu, słupa, rzadziej bi- piramidy	andaluzyt (110)
Tetragonalny	dwuścianu, słupa, rzadziej bi- piramidy	scheelit (101); rutil (110)
Trygonalny (romboedryczny)	romboedru	kalcyt ($10\bar{1}1$)
Heksagonalny	dwuścianu, słupa heksagonalnego	beryl (0001); piromorfit ($10\bar{1}0$)
Regularny	sześcianu, ośmiościanu, dwuna- stościanu rombowego	spinel syntetyczny (100); fluoryt (111); sfaleryt (110)

Położenie płaszczyzn łupliwości w kryształach jest uwarunkowane jego strukturą wewnętrzną. Płaszczyzny łupliwości są równoległe do płaszczyzn sieciowych kryształu najslabiej połączonych ze sobą wiązaniami chemicznymi. Położenie płaszczyzn łupliwości w kryształach określa się za pomocą wskaźników Millera. W kryształach z poszczególnych układów krystalograficznych można przewidzieć występowanie pewnych kierunków płaszczyzn łupliwości (tab. 8).

Powierzchnie łupliwości, zależnie od ich jakości, bywają dzielone na:

- dokładne,
- wyraźne,
- zauważalne.

Podobnie dzieli się kryształy zależnie od ich podatności na podział. Na tej podstawie wyróżnia się kryształy o łupliwości:

- doskonałej,
- wyraźnej,
- niewyraźnej.

Niektóre kryształy mają pewne uprzywilejowane płaszczyzny podziału, czyli tzw. oddzielność. Płaszczyzny oddzielności mogą mieć wygląd podobny do płaszczyzn łupliwości. Ich obecność w kryształach niekiedy jest uwarunkowana zbliznieniami (korund). Czasem są to powierzchnie znaczące strefy budowy pasowej kryształu lub zasięg transformacji w kryształach, np. strefy dyfuzji.

Przełam jest zazwyczaj odpowiedzią kryształu na uderzenie (szok mechaniczny). Zdarza się w kryształach, które źle się łupią. Zależnie od cech powierzchni przełamu wyróżnia się przełam:

- nierówny,
- muszlowy,
- zadziorowaty.

3.4. Własności optyczne

Świat widzianych przedmiotów składa się z ciał świecących i oświetlanych. Materiały gemmologiczne należą do ciał oświetlanych, czyli pobierających promieniowanie świetlne z zewnątrz i przetwarzających je w określony sposób. Sposób przetworzenia pobranego z zewnątrz promieniowania świetlnego określają cechy optyczne materiałów gemmologicznych. Zwykle pod nazwą określonej cechy optycznej materiału gemmologicznego rozumie się subiektywne wrażenie odbierane przez nasze zmysły — np. barwa, przezroczystość, zdolność refleksyjna. W rzeczywistości jest to jednak obiektywnie istniejące zjawisko fizyczne stanowiące zewnętrzny stymulator tego wrażenia. Terminologia doznań i wrażeń optycznych jest przenoszona do opisu obiektywnie istniejącej materialnej sfery zjawisk optycznych, toteż w nomenklaturze wielu zjawisk optycznych kryje się pewien dualizm. Określoną cechą optyczną rozumieć bowiem można zarówno jako subiektywne wrażenie zmysłowe, jak i stymulujące je, obiektywnie istniejące zjawisko fizyczne. Są wreszcie zjawiska świetlne, które nie oddziałują bezpośrednio na zmysły człowieka. O ich istnieniu dowiadujemy się pośrednio poprzez wpływ wywierany na zauważalne zmysłami cechy optyczne.

3.4.1. Środki obserwacji

Oceniając i identyfikując materiały gemmologiczne, rozpoznanie obiektu rozpoczyna się zwykle od poznania makroskopowego wspomaganego prostymi środkami obserwacji. Czasem wystarczy tylko lupa (tzw. badanie lupowe), innym razem trzeba zaangażować również binokular lub mikroskop polaryzacyjny.

3.4.1.1. Lupa

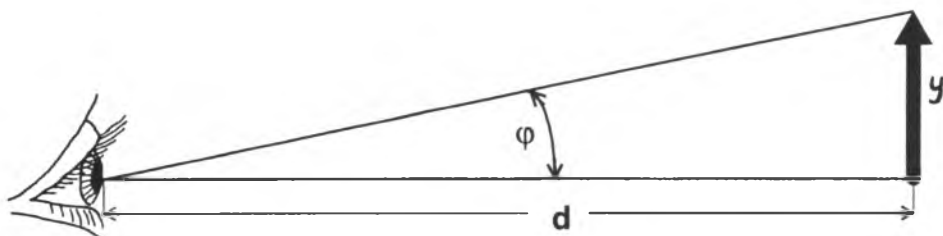
Obraz, jaki daje układ optyczny oka ludzkiego, tworzy się na siatkówce. Ponieważ oko ogląda przedmioty położone w różnej odległości, ma zdolność akomodacji, która polega na zmianie krzywizny powierzchni soczewki ocznej spowodowanej napięciem mięśni wzrokowych. Wyróżnia się dwa punkty charakterystyczne akomodacji: tzw. punkt daleki i punkt bliski. Są to najdalej i najbliżej położone punkty, które można jeszcze zobaczyć wyraźnie. Dla normalnego oka leżą one odpowiednio w nieskończoności i w odległości około 10 cm od oka. Odległość 25 cm, z którą najczęściej się spotykamy, jest odległością dobrego widzenia dla oka normalnego, przy której nie jest wyczuwalne jeszcze nużące napięcie mięśni akomodujących. Oglądanie przedmiotów z mniejszej odległości, a więc pod większym kątem, połączone jest z szybkim zmęczeniem oka.

Zastosowanie lupy pozwala uzyskać znaczące powiększenie kąta widzenia bez zmęczenia oka. Jeśli kąt widzenia oznaczmy przez φ , a wielkość przedmiotu widzianego przez y , to kąt widzenia określa wzór:

$$\operatorname{tg} \varphi = y/d,$$

gdzie:

d — odległość dobrego widzenia okiem nieuzbrojonym przedmiotu y (rys. 44).



Rys. 44. Kąt widzenia (φ) obiektu (y) okiem nieuzbrojonym (o) z odległości dobrego widzenia (d)

Powiększenie kątowe lupy określa stosunek kąta, pod jakim widzimy przedmiot przez lupę, do kąta, pod jakim widzimy go okiem nieuzbrojonym, czyli:

$$\bar{\omega} = \varphi' / \varphi,$$

gdzie:

$\bar{\omega}$ — powiększenie kątowe,
 φ — kąt widzenia przedmiotu bez lupy,
 φ' — kąt widzenia przedmiotu przez lupę.

Jeśli kąty te nie są zbyt duże, to zamiast stosunków kątów można uwzględnić stosunek ich tangensów:

$$\omega' = \operatorname{tg} \varphi' / \operatorname{tg} \varphi,$$

gdzie:

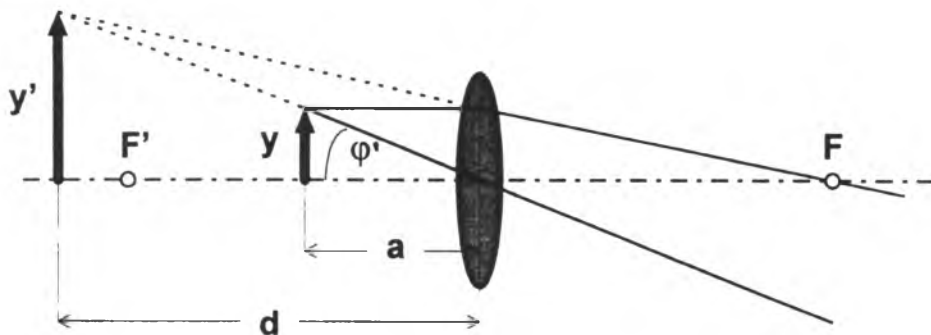
ω' — powiększenie kątowe lupy.

Przy ustalaniu powiększenia kąowego lupy zakłada się, że obraz pozorny dawany przez lupę znajduje się w odległości dobrego widzenia (rys. 45), jeśli zatem:

$$\operatorname{tg} \varphi' = y'/d,$$

gdzie:

φ' — kąt widzenia przedmiotu przez lupę,
 y' — wielkość przedmiotu widzianego przez lupę,
 d — odległość obrazu przedmiotu od lupy równa odległości dobrego widzenia.



Rys. 45. Powiększenie kątowe lupy

F, F' — ogniska, a — odległość przedmiotu od soczewki, d — odległość obrazu od soczewki, y, y' — przedmiot i jego obraz, ϕ — kąt widzenia przez lupę

to:

$$\bar{w}' = y'/y = d/a,$$

gdzie:

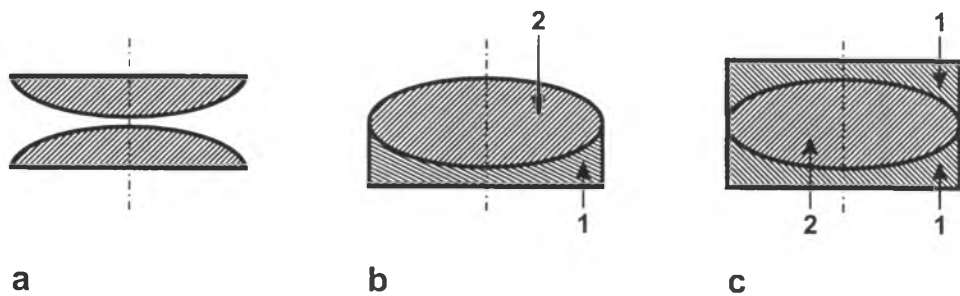
- \bar{w}' — powiększenie kątowe lupy,
- y — wielkość przedmiotu,
- y' — wielkość przedmiotu widzianego przez lupę,
- d — odległość obrazu przedmiotu od lupy równa odległości dobrego widzenia,
- a — odległość przedmiotu od lupy.

Podczas obserwacji oko jest silnie zbliżone do lupy, a przedmiot obserwowany umieszcza się w odległości nieco mniejszej lub równej ogniskowej. Powstaje wtedy obraz prosty, pozorny i powiększony w odległości najlepszego widzenia. Ponieważ można przyjąć z pewnym przybliżeniem, że odległość przedmiotu od lupy jest zbliżona do ogniskowej, a odległość dobrego widzenia jest stała i wynosi około 25 cm, powiększenie kątowe lupy wzrasta więc wraz ze zmniejszaniem się jej ogniskowej. Z tego wynika też, że powiększenie będzie większe od średniego u dalekowidzów, a mniejsze u krótkowidzów, gdyż dla nich odległość dobrego widzenia jest odpowiednio większa i mniejsza od przeciętnej odległości normalnie widzących.

Pospolicie używane lupy mają ogniskową mieszczącą się między 10 mm i 125 mm, toteż dają powiększenia rzędu 2,0—25 razy. Lupa jest zbudowana z jednej soczewki skupiającej (lupy proste) bądź z układu soczewek (lupy złożone; rys. 46).

Lupy, podobnie jak i inne rzeczywiste układy optyczne, wykazują aberracje, czyli wady odwzorowań przejawiające się pewną nieostrością, zniekształceniem i barwnością konturów obrazów obserwowanych przedmiotów. Wady odwzorowań dzieli się na geometryczne i chromatyczne (rys. 47). Przyczyną aberracji geometrycznych są:

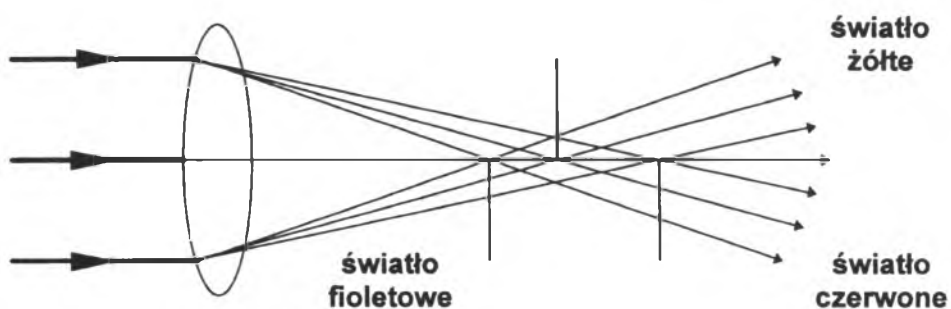
- kształty używanych soczewek, które przy 8—15-krotnych powiększeniach muszą mieć już dużą krzywiznę,
- geometria oświetlenia.



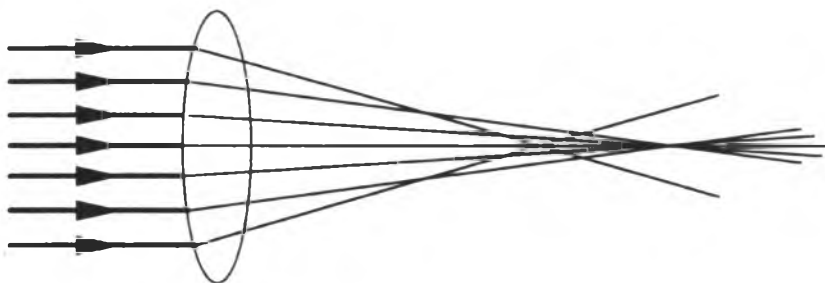
Rys. 46. Lupy złożone

a — aplanatyczna, **b** — achromatyczna, **c** — aplanatyczno-achromatyczna (1 — szkło typu *flint*, 2 — szkło typu *crown*)

a



b

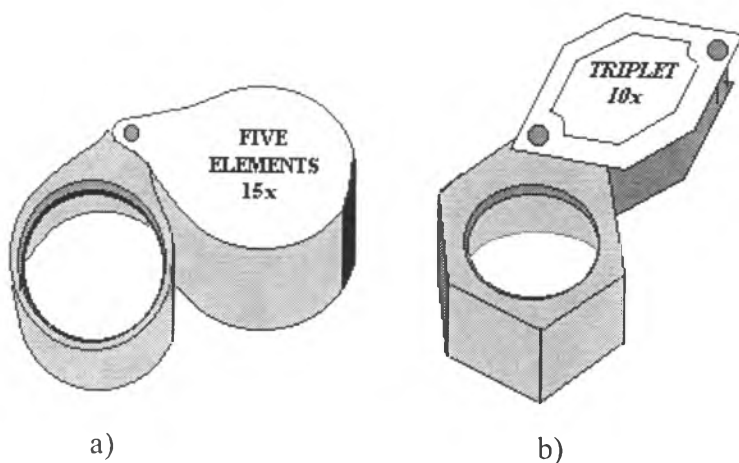


Rys. 47. Aberracja chromatyczna (**a**) i geometryczna (**b**) soczewki skupiającej (lupy prostej) (wg Reada, 1991)

Powodem aberracji chromatycznej jest dyspersja światła przy załamaniu, wskutek której ogniskowe promieni poszczególnych barw różnią się. Dla fal elektromagnetycznych o najmniejszej długości z widma widzialnego ogniskowe są najkrótsze, a dla fal najdłuższych — odpowiednio najdłuższe.

Zjawiskom tym przeciwdziała się poprzez właściwy dobór kształtu i układu soczewek, ich średnicy roboczej oraz przez zastosowanie do ich wytworzenia odpowiednich materiałów, np. szkła optycznego typu *flint* i *crown* lub kryształów typu fluorytu (por. rys. 46). Używane do budowy soczewek szkło optyczne typu *flint* jest materiałem zawierającym znaczne ilości tlenku ołowiu, dzięki czemu silnie rozszczepia światło białe ($n_C = 1,55$; $n_F = 1,9$), natomiast *crown* jest szkłem optycznym o małej różnicy współczynników załamania światła czerwonego i fioletowego ($n_C = 1,5$; $n_F = 1,51$) dzięki zawartości tlenku potasu i nieznacznej zawartości tlenku ołowiu. Ograniczenie aberracji przeprowadza się, łącząc ze sobą odpowiednio uformowane soczewki wykonane z różnych gatunków szkła, np. soczewkę zbierającą z *crownu*, a rozpraszającą z *flintu*. W takim układzie usuwana jest aberracja tylko dla dwu barw dobranych zależnie od przewidywanych zastosowań soczewek — np. dla czerwonej i niebieskiej. Ogniska pozostałych barw nie pokrywają się i układ wykazuje wówczas aberrację chromatyczną drugiego rzędu, którą można zmniejszyć, budując układ bardziej złożony — apochromat. Tak złożonych układów korygujących nie stosuje się w lupach standardowo.

W celach identyfikacji i oceny materiałów gemmologicznych zadowalającą jakość mają lupy aplanatyczno-achromatyczne o powiększeniu od 8 do 15 razy i średnicy roboczej około 18—20 mm. Zbudowane są one przeważnie z dopasowanych do siebie trzech lub pięciu odpowiednio uformowanych soczewek wykonanych z właściwie dobranych gatunków szkła optycznego (rys. 48).



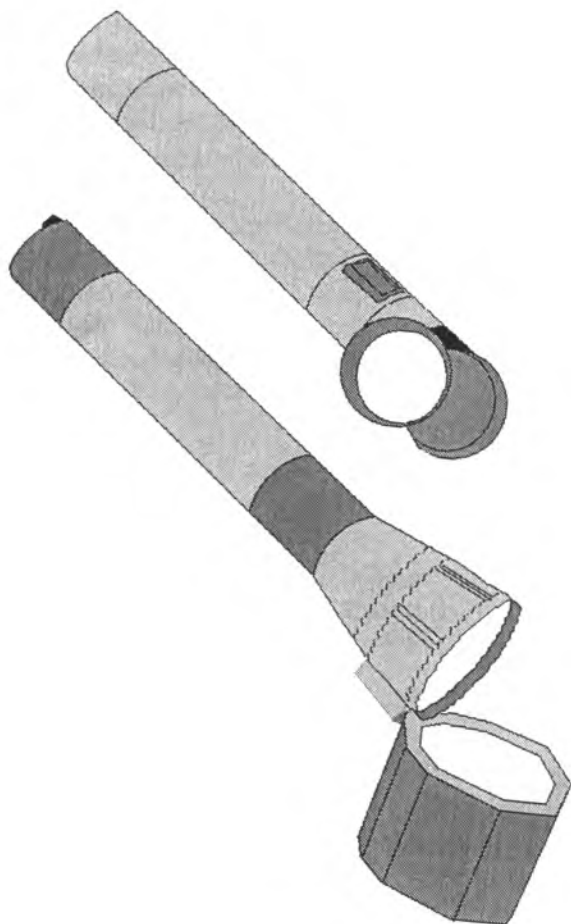
Rys. 48. Lupa gemmologiczna złożona
a) pięcioelementowa, b) trójelementowa

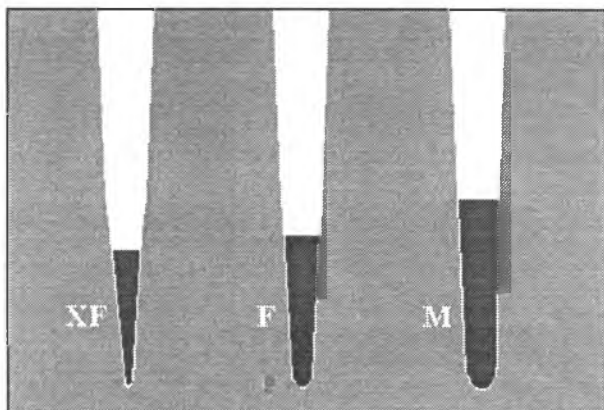
Okrągłe, sześcioboczne, prostokątne lub kwadratowe oprawki zaopatrzone w mechaniczną osłonę części roboczej, wykonane z metalu (np. stal chromowa), aluminium lub tworzywa sztucznego, zapewniają lupie trwałość, ochronę przed uszkodzeniem czy zabrudzeniem, a jednocześnie dają wygodny uchwyt podczas prowadzenia obserwacji lupą.

W mniej wyrafinowanych obserwacjach można używać lup dwusoczewkowych, aplanatycznych bądź achromatycznych. Charakteryzują się one podobnym powiększeniem i średnicą roboczą jak lupy aplanatyczno-achromatyczne.

Niektóre lupy są standardowo wyposażone w bardzo poręczne, autonomiczne oświetlenie ułatwiające prowadzenie obserwacji w różnych okolicznościach i zapewniające powtarzalność warunków oświetlenia (rys. 49).

W wielu czynnościach związanych z obserwacją optyczną różnej wielkości obiektów bardzo przydatne i ułatwiające pracę są różne drobne narzędzia i akcesoria.



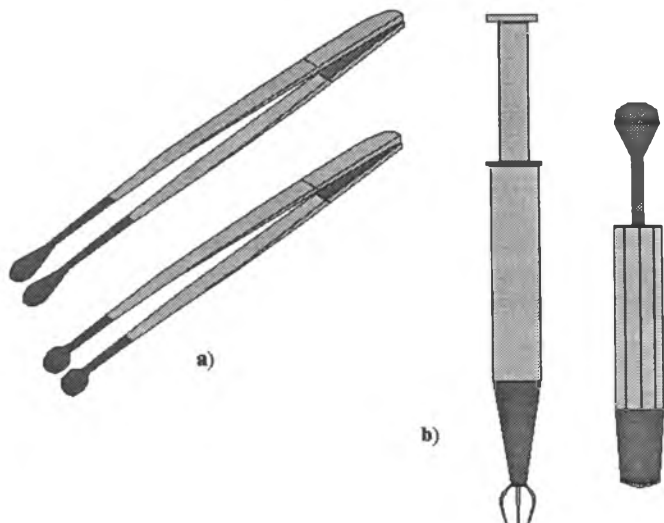


Rys. 50. Najczęściej stosowana smukłość części chwytnej standardowych pincet gemmologicznych

Nieomal stale potrzebne jest posługiwanie się pincetami, z których wiele przeznaczonych jest tylko do określonych manipulacji. Końcówki pincet wykonywane są w trzech podstawowych wariantach (rys. 50):

- *XF* (bardzo cienkie),
- *F* (cienkie),
- *M* (średnie).

Niektóre pincety mają końcówki robocze o specjalnym kształcie i są przeznaczone do pracy z określonym rodzajem obiektów gemmologicznych, np. tylko z perłami (rys. 51a). Spotyka się również pincety z chwytą końcówką (rys. 51b), wyposażone w trzy lub cztery pazurkowate obejmy. Tego rodzaju pincety są bardzo przydatne w długotrwałych pracach z obiektem.

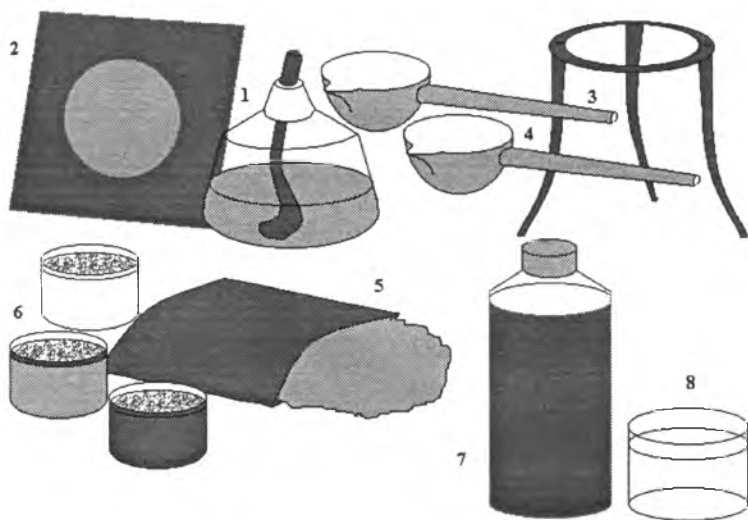


Rys. 51. Pincety gemmologiczne o różnym przeznaczeniu
a) do pracy z perłami, b) z chwytą końcówką

Standardowe pincety są zwykle galwanicznie chromowane, oksydowane lub pokryte teflonową powłoką ochronną. Ich długość wynosi 14—16 cm. Spotyka się również pincety o większej długości, wynoszącej 25 cm, które przeznaczone są do prac związanych z czyszczeniem obiektów gemmologicznych w specjalnie do tego celu przeznaczonych urządzeniach (rys. 52).



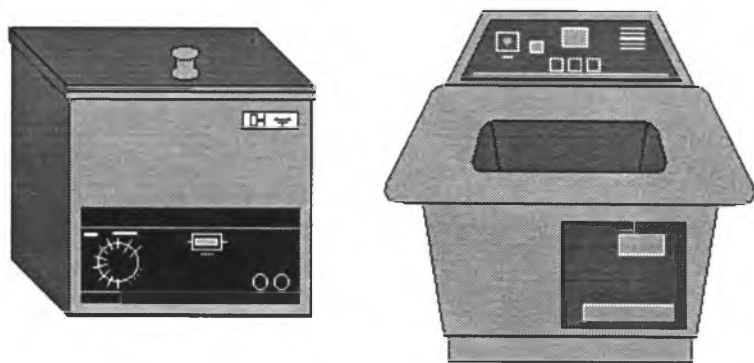
Rys. 52. Pinceta przedłużona (używana przeważnie do prac polegających na czyszczeniu obiektów gemmologicznych)



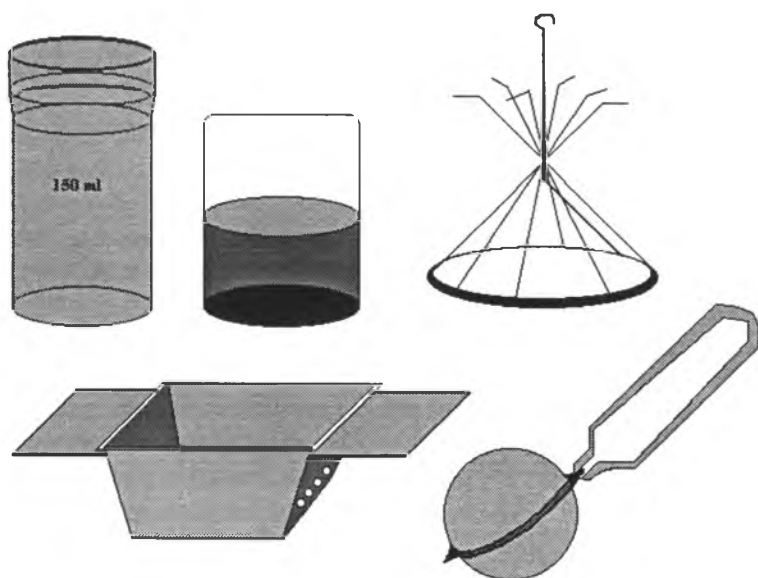
Rys. 53. Prosty zestaw narzędzi do czyszczenia obiektów gemmologicznych

1 — palnik spirytusowy, 2 — siatka ogniotrwała, 3 — trójnóg, 4 — tyle porcelanowe, 5 — włókna, 6 — podstawowe środki czyszczące (sól, potaż, pył), 7 — alkohol, 8 — naczynie do przemywania w alkoholu

Czyszczenie kamieni jest niezbędną czynnością poprzedzającą badanie optyczne. W ofercie handlowej znajduje się wiele urządzeń ułatwiających właściwe wykonanie tej czynności. Są to urządzenia zupełnie proste (rys. 53), ale także bardzo zaawansowane technologicznie, np. czyszczarki ultradźwiękowe (rys. 54). Czyszczarki są w pełni zautomatyzowane i umożliwiają zaprogramowanie warunków i przebiegu procesu czyszczenia, np. kąpiel zimna,



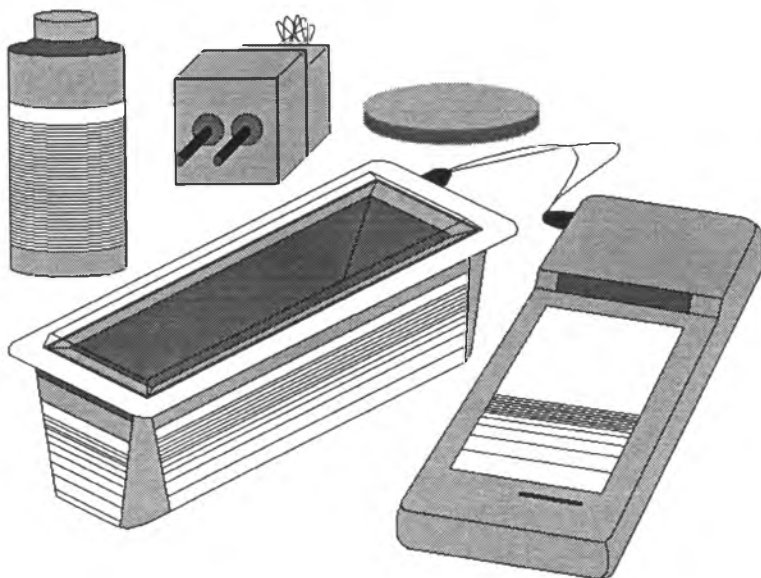
Rys. 54. Czyszczarki ultradźwiękowe do oczyszczania obiektów gemmologicznych



Rys. 55. Uchwyty i pojemniki stosowane przy ultradźwiękowym oczyszczaniu obiektów gemmologicznych

kąpiel ciepła w 35—38°C, limitowany czas przebiegu procesu. Do umieszczenia obiektu gemmologicznego w urządzeniu czyszczącym służą różnego rodzaju uchwyty i pojemniki (rys. 55). Jako cieczy czyszczącej używa się specjalnie w tym celu spreparowanych koncentratów.

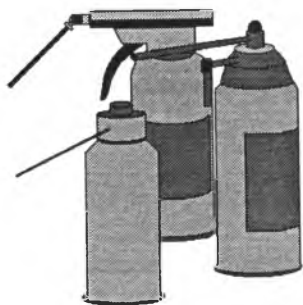
Oferowane są także urządzenia przeznaczone do czyszczenia obiektów gemmologicznych, które z uwagi na ich właściwości fizyczne, np. ukryte spękania, łupliwość, nie powinny być czyszczone za pomocą urządzeń wykorzystujących ultradźwięki. Zestaw taki, znany pod nazwą „Ion luster”, wykorzystuje metodę czyszczenia jonowego (rys. 56) i stosowany jest przeważnie do czyszczenia złożonych powierzchni z wprawionymi w nie obiektami gemmologicznymi.



Rys. 56. Zestaw do oczyszczania jonowego

Niekiedy obiekty wymagają tylko niewielkiego odkurzenia. Do tego celu używa się pojemników ze sprężonym, nietoksycznym, przyjaznym środowisku gazem (rys. 57). Pojemniki te zaopatrzone są w różnej wielkości dysze zmieniające położenie: wertykalnie o 180° i planarnie o 360° . Wielkość pojemników jest tak dobrana, że można nimi dogodnie manipulować jedną ręką.

Zapewnieniu czystości w czasie pracy z materiałami gemmologicznymi służą różnego rodzaju rękawiczki i ściereczki. Utrzymanie w czystości sprzętu optycznego używanego do obserwacji gemmologicznych, a w szczególności jego elementów optycznych ułatwiają zestawy czyszczące (rys. 58), które prze-



Rys. 57. Gazowe „odkurzacze” obiektów gemmologicznych



Rys. 58. Zestaw do oczyszczania elementów optycznych w sprzęcie gemmologicznym

znaczone są do usuwania wszelkich tłustych plamek, przyklejonych włókien i okruszków oraz osadu z dymu papierosowego.

W ofercie handlowej jest wiele urządzeń, których główny element roboczy stanowi lupa występująca w nich w różnych wersjach i konfiguracjach roboczych. Oferowane są urządzenia zapewniające korzystne warunki ekspozycji obiektów gemmologicznych, ułatwiające ich obróbkę lub pomiary. Zwykle są to urządzenia wykorzystujące lupy o małym powiększeniu (2—4 razy) i relatywnie dużej średnicy roboczej (60—120 mm). Mogą być łączone z okularami lub być elementem nakładanym na głowę. Takie urządzenia odgrywają równocześnie rolę zabezpieczenia ochronnego, np. oczu.

Podczas prowadzenia obserwacji lupą nader ważnym zagadnieniem jest oświetlenie. W pracy z lupą można się posługiwać oświetleniem naturalnym lub sztucznym spełniającym wymogi standardowego źródła światła białego. Obserwacje wykonuje się w pozycji siedzącej, najlepiej wspierając obie ręce na stole i przytrzymując lupę prawą ręką blisko prawego oka, natomiast lewą ręką podtrzymując w palcach lub za pomocą pincety oglądany obiekt, zbliżamy go do lupy na odległość około 2—3 cm. Dla precyzyjnej obserwacji obiektu konieczne jest nieprzerwane utrzymywanie go w stałej odległości od lupy umożliwiającej zachowanie ostrości widzenia. W tym celu jest zalecane wzajemne podtrzymywanie się obu rąk wspierających się na stole i stykających się ze sobą lub używanie uchwytów zintegrowanych z lupą (rys. 59). Zapobiega to drobnym wzajemnym przemieszczeniom pogarszającym ostrość widzenia wybranego elementu badanego obiektu, choć jest mniej wygodne podczas dokonywania manipulacji obiektem. Jeśli posługujemy się sztucznym oświetleniem, to powinno się używać lamp mających możliwość regulacji położenia klosza. Umieszcza się go w taki sposób, aby snop światła padał na twarz wykonującego badanie skośnie z góry, przy czym górna krawędź strugi światła powinna się pokrywać z wysokością brwi.



Rys. 59. Zintegrowany uchwyt stosowany w badaniach lupowych

Badanie obiektu gemmologicznego lupą umożliwia dokonanie wstępnych obserwacji dotyczących głównie:

- barwy i jej rozmieszczenia,
- przezroczystości,
- zawartości i rozmieszczenia większych inkluzji i defektów,
- brylancji,
- rodzaju i jakości nałożonego szlifu oraz jego proporcji.

Na podstawie obserwacji wyglądu i stanu krawędzi fasetek obiektów szlifowanych w pewnym przybliżeniu można ocenić ich twardość i dwójłomność, a niekiedy udaje się również zauważyć barwy pleochroiczne.

3.4.1.2. Binokulary

Widzenie przestrzenne ma bardzo ważne znaczenie w identyfikacji i ocenie materiałów gemmologicznych. Najbardziej naturalnym widzeniem przestrzennym jest sposób widzenia oczu. Polepszeniem warunków widzenia przestrzennego zajmuje się stereoskopia. Jest to metoda otrzymywania obrazów dających wrażenie bryłowatości przedmiotów i ich rozmieszczenia w przestrzeni. Widzenie przestrzenne polepsza się znacząco, gdy zamiast oglądać przedmiot obojętnie oczu doprowadzamy do nich promienie pochodzące z przedmiotu za pomocą odpowiedniego urządzenia. W tym celu wykorzystuje się mikroskopy binokularne. Standardowy binokular składa się z dwu nachylonych do siebie pod pewnym kątem mikroskopów monokularnych, przez które obserwuje się jednocześnie przedmiot. Kąt między osiami mikroskopów wynosi około 16° i odpowiada kątowi osi oczu akomodowanych na odległość wyraźnego widzenia.

Binokular choć nie jest tak uniwersalny jak lupa, to daje wielokrotnie większe powiększenia (przeważnie od kilku do kilkudziesięciu razy), powtarzalne warunki oświetlenia badanego przedmiotu i pewien komfort pracy, co też nie jest bez znaczenia.

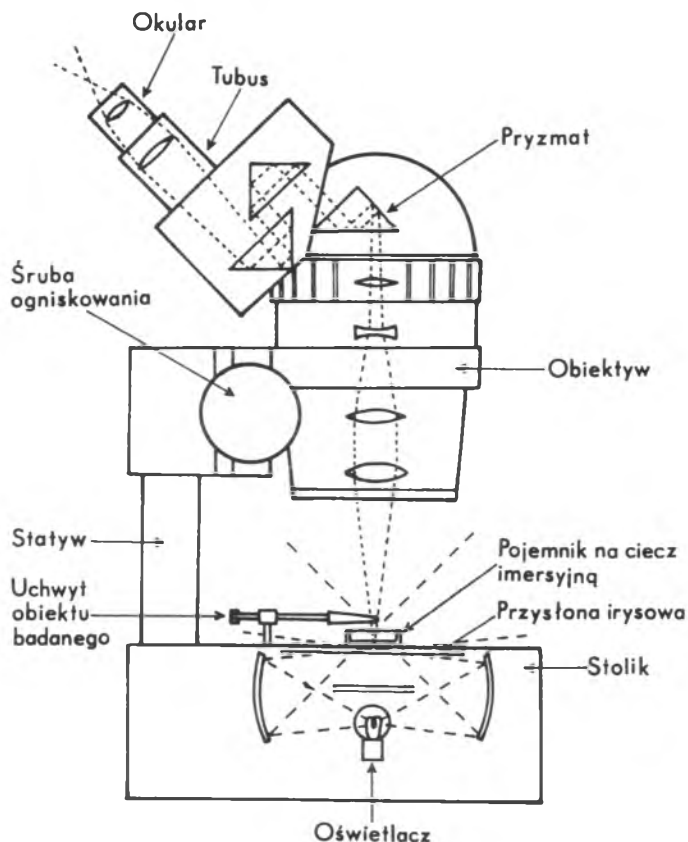
Binokulary specjalnie przystosowane do potrzeb gemmologicznych skonstruowano już kilkadziesiąt lat temu. Znane są pod nazwą **gemolitów** (GemoLite) i **gemskopów** (GemScope) — wyposażone w liczne udogodnienia i przystosowania przydatne w badaniach gemmologicznych (rys. 60).

Układ optyczny binokularu tworzy zestaw złożony z obiektywu i okularu. Umożliwia on uzyskanie powiększeń 10—70 razy, przy czym mogą one być łatwo podwojone przez zastosowanie dodatkowej soczewki nakładanej na obiektyw. Stopniową zmianę skali powiększenia zapewnia specjalna dźwignia (tzw. zoom). Śruba ogniskowania umieszczona w ramieniu statywu pozwala płynnie przemieszczać płaszczyznę największej ostrości na coraz to inny poziom obserwowanego obiektu. Układ optyczny jest tak skonfigurowany, że zapewnia:

- wystarczająco szerokie pole widzenia (10—25 mm przy powiększeniu dziesięciokrotnym),
- dużą jasność obrazu,
- wierne odtworzenie barw i kształtów,
- wysoki kontrast,
- dużą głębię ostrości.

Są to właściwości bardzo przydatne w badaniu obiektów gemmologicznych.

Na umocowanie badanego obiektu nad stolikiem binokularu pozwala specjalny, wymienny uchwyt dający rozległe możliwości różnorodnych manipulacji. Obrotowy statyw binokularu (w zakresie kątowym około 50°) pozwala do-



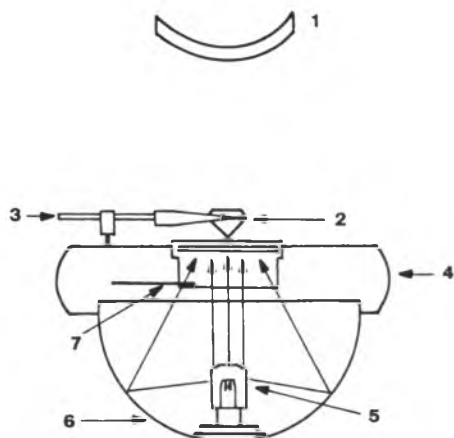
Rys. 60. Binokular gemmologiczny (wg Gübelina, Koivuli, 1986)

stosować położenie ramienia binokularu do indywidualnych potrzeb obserwatora.

Cechą szczególnie wyróżniającą binokular gemmologiczny jest możliwość szybkiej zmiany warunków oświetlenia badanego obiektu. W binokularze gemmologicznym można stosować oświetlenie:

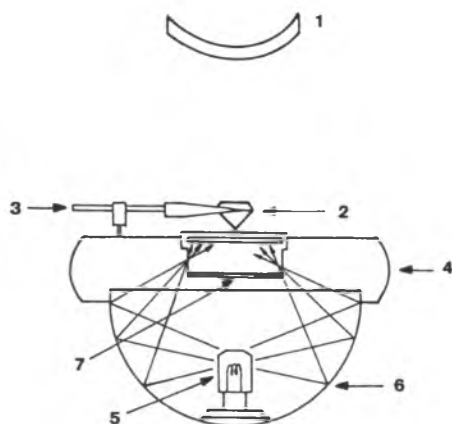
- **jasnopolowe** (rys. 61), gdy główny strumień światła przenikający przez obiekt umieszczony w uchwycie ponad stolikiem binokularu przychodzi bezpośrednio ze źródła światła, którym jest żarówka halogenowa o regulowanym natężeniu światła; stwarza to korzystne warunki obserwacji niektórych typów inkluzji, np. gazowych,

- **ciemnopolowe** (rys. 62), gdy strumień światła przenikający przez obiekt umieszczony w uchwycie ponad stolikiem przychodzi drogą pośrednią odbity najpierw pod różnymi kątami od sferycznej czaszy oświetlacza; bezpośredni strumień światła likwidowany jest przysłoną irysową o otwarciu 2—60 mm; stwarza to dogodniejsze warunki dla obserwacji drobnych nieprzezroczystych inkluzji,



Rys. 61. Oświetlenie jasne w binokularze gemmologicznym (wg Gübelina, Koivuli, 1986)

1 — obiektyw, 2 — badany obiekt, 3 — uchwyt badanego obiektu, 4 — stolik binokularu, 5 — źródło światła, 6 — sferyczna czasza oświetlacza, 7 — przysłona irysowa (wyłączona)



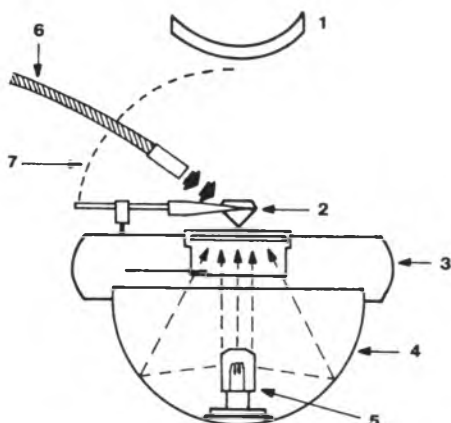
Rys. 62. Oświetlenie ciemne w binokularze gemmologicznym (wg Gübelina, Koivuli, 1986)

1 — obiektyw, 2 — badany obiekt, 3 — uchwyt badanego obiektu, 4 — stolik binokularu, 5 — źródło światła, 6 — sferyczna czasza oświetlacza, 7 — przysłona irysowa (włączona)

- **skośne** (rys. 63), gdy strumień światła przenikający przez obiekt umieszczony w uchwycie ponad stolikiem binokularu podawany jest przez światłowód lub światłowody; stwarza to lepsze warunki dla oceny jakości wykonania szlifu i rozpoznania wad występujących na powierzchni obiektu,

- **rozproszone** (np. przez zastosowanie matówki); stwarza to sprzyjające warunki do obserwacji zonalności i różnych struktur liniowych,

- **punktowe** silnie skupioną wiązką światła celem oceny cech pojedynczych inkluzji.

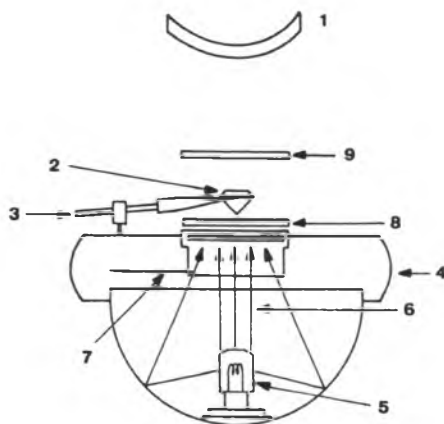


Rys. 63. Oświetlenie skośne w binokularze gemmologicznym (wg Gübelina, Koivuli, 1986)

1 — obiektyw, 2 — badany obiekt, 3 — stolik binokularu, 4 — sferyczna czasza oświetlacza, 5 — źródło światła, 6 — światłowód, 7 — zakres kątowy skośnego oświetlenia

W obserwacjach binokulem wykorzystywane bywa również **światło odbite** służące lepszemu rozpoznaniu charakteru pewnych defektów powierzchni niektórych obiektów, np. drobnych ubytków, szczelinek i pęknięć.

Istnieje możliwość dobierania różnej konfiguracji warunków oświetlenia (np. ciemnopolowe połączone ze skośnym). Dodatkowym źródłem światła, używanym tylko w badaniach pewnych obiektów, np. diamentów, jest mocowana do stolika binokularu gemmologicznego halogenowa lampa emitująca **światło ultrafioletowe**. Niekiedy binokular gemmologiczny bywa wyposażany również w możliwość wytwarzania i analizowania **światła spolaryzowanego** (rys. 64).



Rys. 64. Oświetlenie światłem spolaryzowanym w binokularze gemmologicznym (wg Gübelina, Koivuli, 1986)

1 — obiektyw, 2 — badany obiekt, 3 — uchwyt badanego obiektu, 4 — stolik, 5 — źródło światła, 6 — strumień oświetlenia jasnopolowego, 7 — przysłona irysowa (wyłączona), 8 — polaryzator, 9 — analizator

Badanie binokularne obiektu gemmologicznego rozpoczyna się od najmniejszych powiększeń porównywalnych z powiększeniem standardowej lupy gemmologicznej. Zwraca się wówczas uwagę na:

- wygląd zewnętrzny obiektu,
- rodzaj i dokładność nałożonego szlifu,
- ostrość krawędzi i naroży,
- obecność zarysowań, odprysnięć i innych uszkodzeń występujących na powierzchni obiektu.

Odpowiednio dostosowane powiększenie i oświetlenie pozwalają dokonać obserwacji wnętrza obiektu. Na tym etapie obserwacji zwraca się uwagę na takie cechy obiektu gemmologicznego, jak:

- czystość wnętrza, która bywa uwarunkowana rodzajem, ilością i sposobem występowania inkluzji,
- obecność powierzchni nieciągłości, np. powierzchni sklejenia, zrostu bliźniaczego,
- strefy wzrostu kryształu (zonalność),
- specjalne efekty optyczne, np. opalescencja, adularescencja.

Dzięki takim obserwacjom można często już na tym etapie badań odróżnić obiekty naturalne od syntetycznych, wyróżnić dublety, tryplety, multiplety lub obiekty rekonstruowane.

Dodatkowo w pewnych sytuacjach stosuje się badanie binokularne obiektu po uprzednim zanurzeniu go w przezroczystym pojemniku z cieczą immersyjną (zwykle z wykorzystaniem binokularu o poziomej osi optycznej). Przeważnie jest to jodek metylenu ($n = 1,74$), monobromonaftalen ($n = 1,66$) lub benzylobenzoat ($n = 1,57$) (por. rys. 60). Zanurzenie w cieczy immersyjnej redukuje zjawiska optyczne zachodzące na powierzchni obiektu, a także niektóre pochodzące z jego wnętrza, np. dyspersję, co znacząco polepsza warunki obserwacji wnętrza obiektu. Takie warunki umożliwiają dostrzeżenie bardzo drobnych wrostków widocznych dzięki silnym refleksom zewnętrznym i wewnętrznym oraz dzięki silnemu połyskowi. Pozwala to niekiedy już na tym etapie rozstrzygnąć, czy jest to obiekt naturalny czy też syntetyczny. Jednak obserwacje binokularne nie są zwykle wystarczające dla dokonania takich rozstrzygnięć.

Binokulary bywają wyposażone w dodatkowe okulary umożliwiające badanie, np.:

- proporcji obiektów z nałożonym szlifem — np. proporcji szlifów nałożonego na brylanty o wielkości 0,02—5,75 karata.
- pleochroizmu (tzw. okular dychroskopowy).

W ofercie handlowej występują także binokulary składane (tzw. binokular walizkowy). Cechami użytkowymi nie ustępują one binokularom stacjonarnym. Ich zaletą jest możliwość wygodnego przemieszczenia się wraz z najwyższej klasy diagnostycznym sprzętem optycznym.

Binokular może służyć również do wyznaczania przybliżonej wartości współczynnika załamania światła obiektu gemmologicznego metodą tzw. pomiaru bezpośredniego. Pomiaru dokonuje się w myśl wzoru:

$$n = (C-A)/(B-A),$$

gdzie:

- n — współczynnik załamania światła badanego obiektu,
- A — położenie wyostrzonego obrazu powierzchni tafla odczytane na noniuszu śruby mikrometrycznej tubusu binokularu,
- B — położenie wyostrzonego obrazu kołetu (szpica), odczytane na noniuszu śruby mikrometrycznej tubusu binokularu,
- C — położenie — odczytane na noniuszu śruby mikrometrycznej tubusu binokularu — wyostrzonego obrazu powierzchni szkiełka podstawkowego, na którym umieszczono obiekt w taki sposób, by jego tafla była zorientowana prostopadle do osi optycznej binokularu.

Przy odpowiedniej staranności błąd pomiaru współczynnika załamania światła tą metodą nie powinien przekraczać 0,002—0,004.

3.4.2. Odbicie i załamanie światła

Gdy światło napotka na swej drodze inne środowisko, to na powierzchni granicznej zostaje w części:

- odbite,
- rozproszone,

- pochłonięte,
- załamane, przechodząc do drugiego środowiska.

Zjawisko załamania fali na granicy rozdzielającej ośrodki różniące się prędkością propagacji fali nosi nazwę **refrakcji**.

Prawa załamania światła na granicy środowisk można streścić następująco:

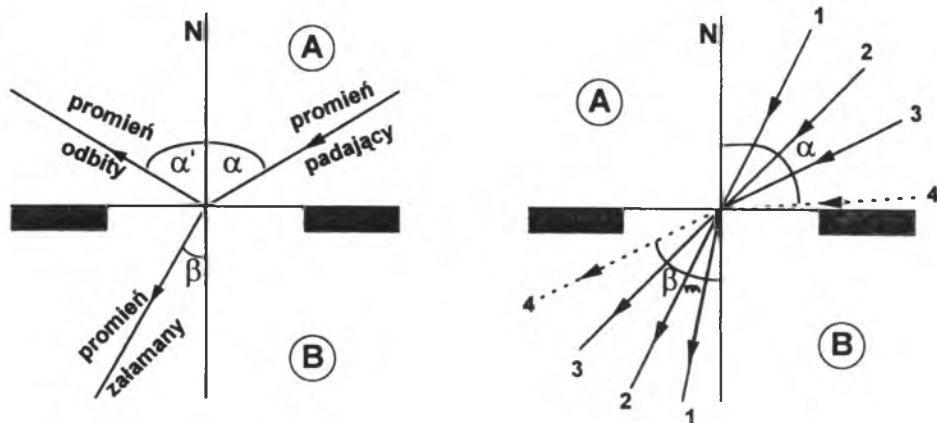
- promień padający, załamany i normalna do powierzchni granicznej leżą w jednej płaszczyźnie (prawo Snelliusa),
- stosunek sinusa kąta padania do sinusa kąta załamania jest wielkością stałą i nazywa się **współczynnikiem załamania światła** środowiska, do którego promień wchodzi względem środowiska, z którego wychodzi; tę samą wartość określa także:
- stosunek prędkości rozchodzenia się światła w obu środowiskach,
- porównanie długości monochromatycznej fali świetlnej z obu środowisk, gdyż przejściu światła monochromatycznego z jednego środowiska do drugiego towarzyszy zmiana długości jego fali bez zmiany jej częstotliwości.

Współczynnik załamania światła (współczynnik refrakcji) próżni przyjęto za równy jedności. Jeśli porównamy prędkość światła w próżni z prędkością światła w danym ośrodku, to otrzymujemy tzw. **bezwzględny współczynnik załamania światła**. Ponieważ w warunkach ziemskich najczęściej zachodzi kontakt badanego ośrodka z powietrzem, toteż wygodniej jest posługiwać się tzw. **względny współczynnikiem załamania światła**. Powstaje on przez porównanie prędkości światła w powietrzu z prędkością światła w badanym ośrodku. Różnica między obu współczynnikami jest nieznaczna, gdyż względny współczynnik załamania światła w powietrzu wynosi 1,000294.

Optycznie gęstsze nazywa się środowisko o większym współczynniku załamania światła. Prędkość fali świetlnej w środowisku optycznie rzadszym jest zatem większa w porównaniu z jej prędkością w środowisku optycznie gęstszym.

Współczynniki załamania światła większości ośrodków względem powietrza i próżni są przeważnie większe od jedności. Również materiały gemmologiczne mają współczynniki załamania światła większe od jedności. Są zatem optycznie gęstsze od powietrza. Ich wartość zawiera się w przedziale 1,3—3,0.

Jak wspomniano, prędkość rozchodzenia się światła w ośrodku jednorodnym zależy od długości fali świetlnej. Wartość współczynnika załamania światła ośrodka fizycznie jednorodnego zależy więc od długości fali użytego światła — przeważnie dla światła fioletowego jest on wyższy niż dla światła czerwonego. Przyjęło się oznaczać wartość współczynników załamania światła różnych środowisk w świetle monochromatycznym żółtym (sodowym $\lambda_{\text{Na}} = 539,0\text{—}539,6\text{ nm}$), co zaznacza się przez umieszczenie symbolu pierwiastka poniżej symbolu współczynnika załamania światła, np. n_{Na} . Przy pobieżnych, orientacyjnych oznaczeniach wartości współczynnika załamania światła stosuje się światło białe.



Rys. 65. Zachowanie się promienia świetlnego na granicy dwu ośrodków podczas przechodzenia z ośrodka optycznie rzadszego (A) do ośrodka optycznie gęstszego (B) (wg Ł a p o t a, 1995)
 α — kąt padania, α' — kąt odbicia, β — kąt załamania, β_m — kąt graniczny

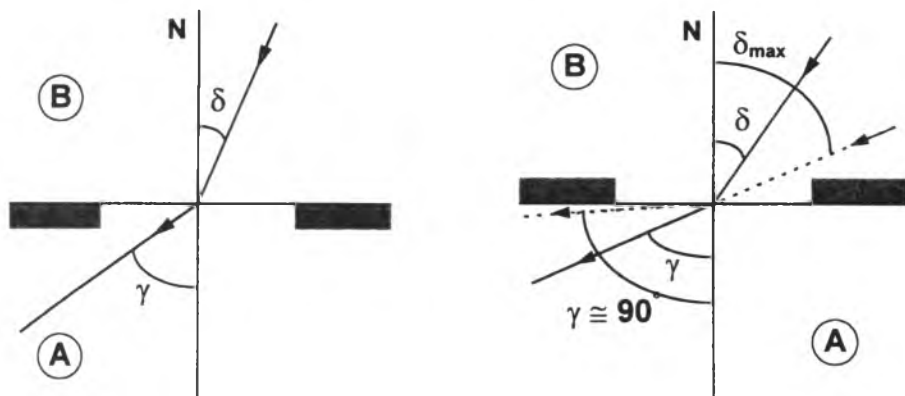
Stwierdzenie wartości współczynnika załamania światła większej od jedności oznacza, że światło przechodzi ze środowiska optycznie rzadszego do środowiska optycznie gęstszego. Jeśli jest on mniejszy od jedności, to światło przechodzi ze środowiska optycznie gęstszego do rzadszego. Światło przechodząc od strony środowiska optycznie rzadszego do optycznie gęstszego ulega zawsze w części załamaniu i w części odbiciu. Powstaje promień załamany i promień odbity. Przy takiej konfiguracji środowisk kąt załamania jest zawsze mniejszy od kąta padania. Przy największym możliwym kącie padania równym 90° promień załamany tworzy z normalną granicy dwu sąsiadujących środowisk największy możliwy kąt załamania dla danej pary środowisk. Kąt ten jest nazywany **kątem granicznym** (rys. 65). Jeśli środowiskiem rzadszym optycznie jest powietrze lub próżnia, to pomiar kąta granicznego daje możliwość wyliczenia wartości współczynnika załamania światła środowiska gęstszego optycznie:

$$n = \sin \alpha / \sin \beta = \sin 90^\circ / \sin \beta = \sin G,$$

gdzie:

- n — współczynnik załamania światła środowiska gęstszego optycznie,
- α — kąt padania,
- β — kąt załamania,
- G — kąt graniczny.

Gdy światło biegnie od strony środowiska optycznie gęstszego, załamuje się na granicy środowisk w ten sposób, że kąt załamania jest zawsze większy od kąta padania. Przy pewnej wartości kąta padania, charakterystycznej dla danej pary środowisk, promień załamany będzie się ślizgał po granicy środowisk (rys. 66).



Rys. 66. Zachowanie się promienia świetlnego na granicy dwu ośrodków podczas przechodzenia z ośrodka optycznie gęstszego (B) do ośrodka optycznie rzadszego (A) (wg Łapota, 1995)
 δ — kąt padania, γ — kąt załamania, δ_{\max} — kąt graniczny pary środowisk (AB)

Wartość kąta padania pokryje się wówczas dokładnie z wartością kąta granicznego. Wobec tego, zgodnie z prawem W. Snelliusa:

$$n' = \sin \delta / \sin \gamma = \sin G / \sin 90^\circ = \sin G = 1/n,$$

gdzie:

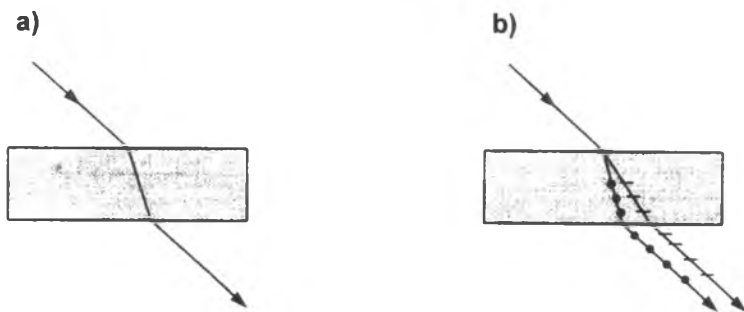
- n' — współczynnik załamania światła środowiska rzadszego optycznie,
- n — współczynnik załamania światła środowiska gęstszego optycznie,
- δ — kąt padania,
- γ — kąt załamania,
- G — kąt graniczny.

Jeśli światło przenikając ze środowiska optycznie gęstszego do środowiska rzadszego padnie na granicę środowisk pod kątem większym od granicznego, to jego załamanie nie nastąpi, gdyż ulegnie ono całkowitemu wewnętrznemu odbiciu i nie wydostanie się przez tak usytuowaną granicę ze środowiska optycznie gęstszego.

Jeśli światło przenika do ośrodka optycznie izotropowego, to zmiana kierunku jego rozchodzenia jest zgodna z ogólnymi prawami załamania (rys. 67a).

Jeśli światło przenika do środowiska anizotropowego optycznie, to następuje podwójne załamanie (powstają dwa promienie załamane; kryształy są dwójłomne; rys. 67b).

Dwójłomność polega na jednoczesnym załamaniu i podziale wiązki światła przenikającego przez granicę ośrodka anizotropowego optycznie na dwie wiązki składowe. **Anizotropia optyczna** to właściwość ośrodka polegająca na tym, że w różnych kierunkach wykazuje on różniące się właściwości optyczne. W kryształach właściwość ta spowodowana jest ich wewnętrzną strukturą, gdyż elementy tkwiące w sieci krystalicznej stanowią w tych ciałach oscylatory anizotropowe o niejednakowej częstotliwości drgań własnych w różnych kierunkach, co

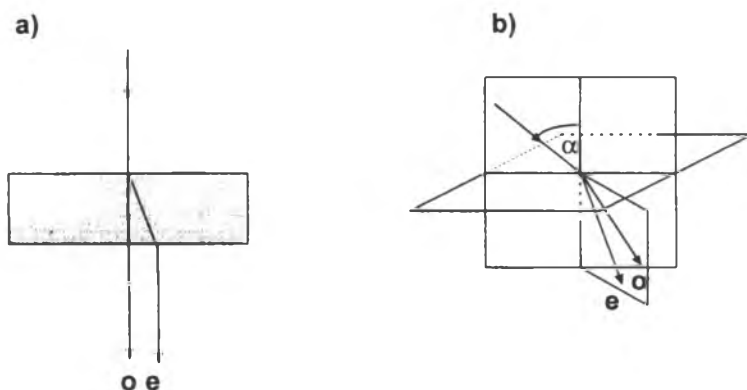


Rys. 67. Załamanie światła (wg Ł a p o t a, 1995)
 a) w środowisku optycznie izotropowym, b) w środowisku optycznie anizotropowym

powoduje zależność prędkości światła w ośrodku anizotropowym od kierunku jego rozchodzenia się.

Jeśli promień światła zostanie przepuszczony prostopadłe do powierzchni granicznej kryształu anizotropowego, to mogą zaistnieć dwa przypadki:

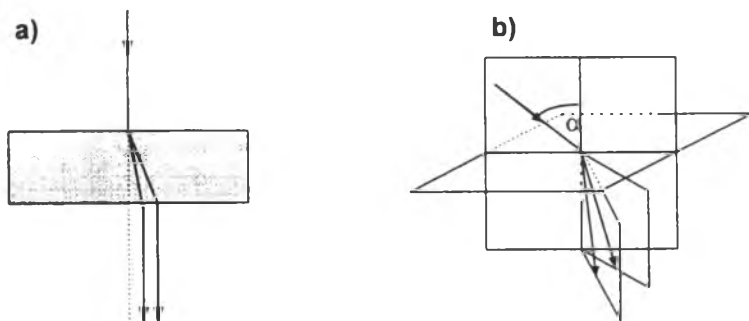
1. Promień światła padającego rozdzieli się na dwie składowe, z których jedna będzie miała kierunek wiązki padającej, a druga ulegnie odchyleniu. Po wyjściu światła z kryształu przez płaszczyznę równoległą do płaszczyzny wejściowej oba promienie będą do siebie równoległe i będą miały kierunek wiązki padającej (rys. 68). Promień przenikający przez kryształ bez załamania nazywany jest promieniem zwyczajnym i oznaczany symbolem *o* (*radius ordinarius*). Promień odchylony od pierwotnego kierunku jest nazywany promieniem nadzwyczajnym i oznaczany symbolem *e* (*radius extraordinarius*). Dokonując rotacji kryształem według normalnej można stwierdzić, że promień zwyczajny nie zmieni swojego położenia, podczas gdy promień nadzwyczajny zakreśli łuk



Rys. 68. Załamanie światła w kryształach optycznie jednoosiowych (wg Ł a p o t a, 1995)
 a) wiązka światła prostopadła do powierzchni przekroju kryształu, b) wiązka światła ukośna do powierzchni przekroju kryształu
 o — promień zwyczajny, e — promień nadzwyczajny, α — kąt padania

po okręgu, którego długość będzie adekwatna do wielkości dokonanej rotacji. Promień nadzwyczajny znajduje się w tzw. przekroju głównym przeświecieranego kryształu, czyli w płaszczyźnie zawierającej kierunek promienia padającego i oś krystalograficzną Z . Przez obrót dokonujemy rotacji przekrojem głównym kryształu i zawartym w nim promieniem nadzwyczajnym. Gdy promień światła rzutuje się na kryształ ukośnie, to otrzymuje się również promień zwyczajny i nadzwyczajny. Promień zwyczajny leży wówczas w płaszczyźnie padania, a promień nadzwyczajny w płaszczyźnie przekroju głównego kryształu. Przez rotację kryształem można doprowadzić do zgodności płaszczyzn padania z płaszczyzną przekroju głównego. Promień zwyczajny i nadzwyczajny znajdują się wtedy w jednej płaszczyźnie — zgodnej z płaszczyzną padania promienia rzutowanego ukośnie. Przepuszczając promień światła zgodnie z kierunkiem osi krystalograficznej Z kryształu, nie uzyska się podwójnego załamania światła, a współczynnik załamania światła dla tego kierunku będzie równy współczynnikowi załamania światła promienia zwyczajnego. Kierunek ten jest nazywany osią optyczną. Zgodnie z kierunkiem osi optycznej promień zwyczajny i nadzwyczajny zlewają się w jeden i dlatego często ten kierunek nazywa się osią izotropizacji lub też kierunkiem izotropizacji. W takich kryształach wartość współczynnika załamania światła promienia zwyczajnego, oznaczana symbolem n_o , jest stała i niezależna od kierunku, natomiast prędkość promienia nadzwyczajnego, oznaczana symbolem n_e , jest zmienna i zależna od kierunku. Największa różnica wartości współczynników załamania światła promienia zwyczajnego i nadzwyczajnego występuje podczas przechodzenia światła w kierunku prostym do kierunku osi optycznej zlewającej się w tego rodzaju kryształach z osią krystalograficzną Z . Brak różnicy wartości współczynników załamania światła występuje wtedy, gdy światło wędruje zgodnie z kierunkiem osi optycznej.

2. Promień światła padającego rozdzieli się na dwie składowe na ogół odchylone od kierunku wiązki padającej (rys. 69). Po wyjściu z kryształu oba promienie będą do siebie równoległe i będą miały kierunek wiązki padającej. W takich kryształach nie można wyróżnić promienia zwyczajnego i nadzwyczajnego, gdyż oba nie stosują się do prawa W. Snelliusa i zachowują się tak, jak promienie nadzwyczajne; ich prędkość zależy od kierunku wędrówki w kryształ, a tym samym i wartości odpowiadających im współczynników załamania światła zależy od kierunku wędrówki światła w kryształ. W takich kryształach występują dwa symetrycznie położone kierunki, w których promienie światła powstałe w wyniku podwójnego załamania mają tę samą prędkość i w związku z tym równe wartości współczynników załamania światła. Kierunki te noszą nazwę osi optycznych i są dość podobne do osi optycznej kryształów wytwarzających promień zwyczajny i nadzwyczajny. W kryształach wytwarzających dwa promienie nadzwyczajne światło biegnąc w kierunku jednej z osi optycznych rozpada się po wyjściu z kryształu na nieskończenie wiele promieni tworzących pobocznice stożka (tzw. refrakcja stożkowa).



Rys. 69. Załamanie światła w kryształach optycznie dwuosiowych (wg Łapota, 1995)
a) wiązka światła prostopadła do powierzchni przekroju kryształu, *b*) wiązka światła ukośna do powierzchni przekroju kryształu; α — kąt padania

Z uwagi na własności optyczne kryształy dzieli się na:

- **optycznie izotropowe** (równokierunkowe), charakteryzujące się stałą, niezależną od kierunku, prędkością rozchodzenia się światła, a tym samym stałą, niezależną od kierunku, wartością współczynnika załamania światła; tak wysoką symetrię optyczną mają tylko kryształy z układu regularnego; jest ona wyższa od symetrii geometrycznej,

- **optycznie anizotropowe** (różnokierunkowe), charakteryzujące się zmienną, zależną od kierunku, prędkością rozchodzenia się światła, a tym samym zmienną, zależną od kierunku, wartością współczynników załamania światła; kryształy takie podwójnie załamują światło, a każdy z powstałych promieni jest spolaryzowany w płaszczyznach wzajemnie prostopadłych; taką symetrię optyczną mają wszystkie kryształy z wyjątkiem należących do układu regularnego.

Kryształy optycznie anizotropowe dzieli się na:

- **optycznie jednoosiowe**, czyli mające jeden kierunek osi optycznej i wytwarzające w wyniku podwójnego załamania spolaryzowany promień zwyczajny i nadzwyczajny; w tej grupie mieszczą się kryształy z układów: trygonalnego, tetragonalnego i heksagonalnego,

- **optycznie dwuosiowe**, czyli mające dwa kierunki osi optycznych i w wyniku podwójnego załamania wytwarzające promienie spolaryzowane zachowujące się tak, jak promień nadzwyczajny kryształów optycznie jednoosiowych; w tej grupie mieszczą się kryształy z układów: rombowego, jednoskośnego i trójskośnego.

Stan optyczny kryształu można odwzorować:

- geometrycznie, za pomocą powierzchni jednopowłokowych lub dwupowłokowych,
- algebraicznie, za pomocą odpowiednich, dość zawiłych równań i funkcji.

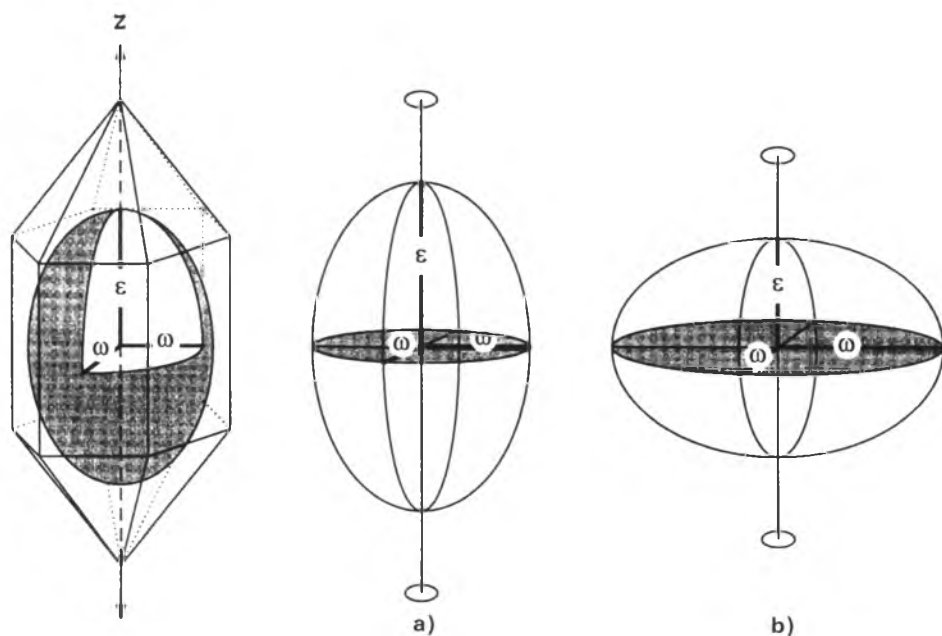
Odwzorowania te odnoszą się do własności optycznych kryształów w świetle monochromatycznym.

Najchętniej stosowanym sposobem obrazowania własności optycznych kryształów są odwzorowania geometryczne, zwłaszcza jednopowłokowe. W kry-

ształach izotropowych wartość współczynnika załamania światła jest niezależna od kierunku. Powierzchnia obrazująca wartość współczynnika załamania światła będzie zatem kulą.

W kryształach anizotropowych wartość współczynników załamania światła zależy od kierunku. Najdogodniej ich wartość obrazuje **indykatrysa**, czyli jednopowłokowa powierzchnia współczynników załamania światła. Indykatryse tworzy powierzchnia elipsoidy obrotowej (dla kryształów jednoosiowych optycznie) lub elipsoidy trójosiowej (dla kryształów dwuosiowych optycznie).

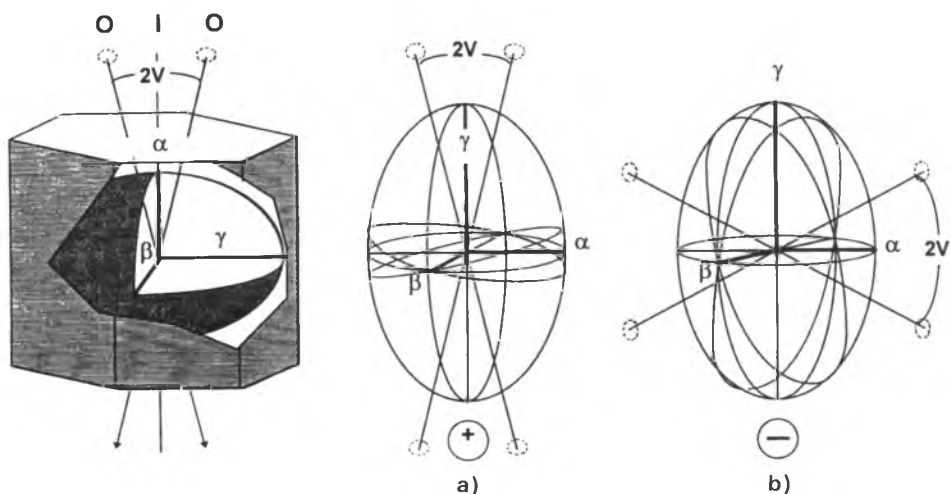
Półosiami elipsoidy obrotowej są wektory \mathbf{n}_e i \mathbf{n}_o (rys. 70). Zgodnie z osią obrotu elipsoidy leży wektor \mathbf{n}_e . Wektor \mathbf{n}_o znajduje się w płaszczyźnie prostopadłej do osi obrotu, w tzw. przekroju kołowym elipsoidy obrotowej. Warto przy tym zaznaczyć, że wszystkie pozostałe przekroje elipsoidy obrotowej są przekrojami eliptycznymi. Przekroje eliptyczne zawierające oś optyczną zwane są przekrojami głównymi elipsoidy. Jest ich nieskończenie wiele. Dla kryształów jednoosiowych dodatnich optycznie ($\mathbf{n}_e > \mathbf{n}_o$) elipsoida obrotowa wydłużona jest biegunowo. Zgodnie z wydłużeniem elipsoidy przebiega oś optyczna kryształu, która zlewa się z osią krystalograficzną Z. Dla kryształów jednoosiowych ujemnych ($\mathbf{n}_e < \mathbf{n}_o$) elipsoida obrotowa jest spłaszczona biegunowo. Zgodnie z wektorem optycznym \mathbf{n}_e przebiega oś optyczna kryształu jednoosiowego ujemnego, która zlewa się z osią krystalograficzną Z.



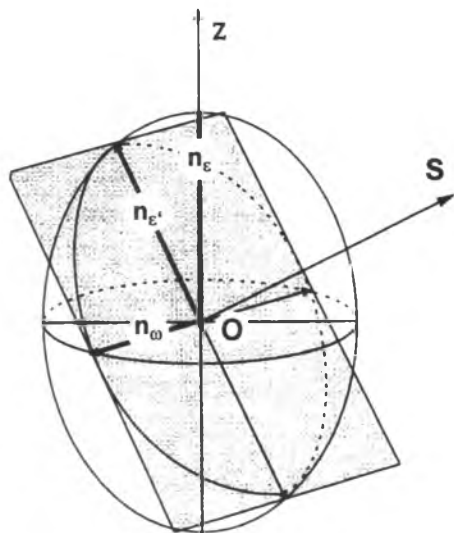
Rys. 70. Indykatrysy kryształów jednoosiowych dodatnich (a) i ujemnych (b) oraz stosunek indykatrysy do geometrycznej bryły kryształu na przykładzie kwarcu (wg Łapota, 1995)

- Półosiami elipsoidy trójosiowej są wzajemnie prostopadłe wektory optyczne:
- \mathbf{n}_γ , wyrażający największą możliwą wartość współczynnika załamania światła w kryształach dwuosiowych optycznie,
 - \mathbf{n}_α , wyrażający najmniejszą możliwą wartość współczynnika załamania światła w kryształach dwuosiowych optycznie,
 - \mathbf{n}_β , wyrażający pośrednią wartość współczynnika załamania światła w kryształach dwuosiowych optycznie.

W elipsoidzie trójosiowej występują dwa symetrycznie położone przekroje kołowe, których promień ma wartość \mathbf{n}_β . Normalne tych przekrojów wyznaczają położenie osi optycznych w kryształach. **Osie optyczne** takich kryształów znajdują się w płaszczyźnie zawierającej wektory \mathbf{n}_α i \mathbf{n}_γ , nazywanej płaszczyzną osi optycznych. Wektor \mathbf{n}_β jest prostopadły do płaszczyzny osi optycznych i bywa nazywany **normalną optyczną** (rys. 71). Warto zauważyć, że wektory \mathbf{n}_α i \mathbf{n}_γ są dwusiecznymi kątów utworzonych przez osie optyczne. Można wyróżnić dwie dwusieczne. Mianem pierwszej dwusiecznej określa się ten wektor optyczny, który występuje w kącie ostrym między osiami optycznymi, natomiast drugą dwusieczną jest ten wektor optyczny, który występuje w kącie rozwartym między osiami optycznymi. W kryształach dwuosiowych dodatnich pierwszą dwusieczną jest wektor \mathbf{n}_γ , a w kryształach dwuosiowych ujemnych pierwszą dwusieczną jest wektor \mathbf{n}_α . Kąt między osiami optycznymi oznacza się symbolem $2V$. Jeśli jest to kąt zawierający wektor \mathbf{n}_γ , to oznacza się go symbolem $2V_\gamma$, a jeśli zawiera wektor \mathbf{n}_α , to oznacza się go symbolem $2V_\alpha$. Jeśli kąty między osiami optycznymi będą równe 0° , to kryształ taki przekształca się w jednoosiowy optycznie, a jego obrazem geometrycznym będzie elipsoida obrotowa. Jeśli kąty między osiami optycznymi będą proste ($2V = 90^\circ$), to nie można wyróżnić pierwszej i drugiej dwusiecznej, a kryształ nazywany jest neutralnym (dodatnio-ujemnym).



Rys. 71. Indykatrysy kryształów dwuosiowych dodatnich (a) i ujemnych (b) oraz stosunek indykatrysy do geometrycznej bryły kryształu na przykładzie muskowitu (wg Łapota, 1995)



Rys. 72. Konstrukcja Fresnela (wg Łapota, 1995)

o , n_o , n_e — płaszczyzna prostopadła do OS ,
czyli kierunku biegu światła w kryształach

Indyktrysa umożliwia określenie dla każdego kierunku biegu światła w kryształach wartości współczynników załamania światła związanych z tymi kierunkami. Dla ich wyznaczenia konieczne jest zastosowanie do powierzchni jednopowłokowej tzw. **konstrukcji Fresnela** (rys. 72). Przecinając indyktryse płaszczyzną prostopadłą do kierunku padającego strumienia światła (płaszczyznę tę można korelować z płaszczyzną przekroju kryształu), otrzymuje się elipsę, której półośe są miarą wartości współczynników załamania światła.

Bezwzględna różnica współczynników załamania światła występująca w kryształach anizotropowych określana jest mianem **dwójłomności** i oznaczana symbolem Δ (tab. 9).

W kryształach jednoosiowych optycznie bezwzględna wartość dwójłomności jest zawsze największa dla światła przechodzącego prostopadle do kierunku osi optycznej. Światło przechodzące zgodnie z kierunkiem osi optycznej nie ulega podwójnemu załamaniu, a tym samym dwójłomność dla tego kierunku wynosi zero. Ponieważ wartość współczynnika załamania fali nadzwyczajnej biegnącej w kryształach jednoosiowych optycznie ukośnie w stosunku do osi optycznej wynosi n_e , dwójłomność dla takiego kierunku będzie wynosiła $n_e - n_o = \Delta$.

Wartość dwójłomności dla kierunków ukośnych biegu światła w stosunku do osi optycznej będzie się zawierała między zerem i bezwzględną wartością maksymalną dwójłomności możliwą w przeświecieranym kryształach.

W kryształach dwuosiowych optycznie bezwzględna wartość dwójłomności jest zawsze największa dla światła biegnącego prostopadle do płaszczyzny osi optycznych, czyli zgodnie z kierunkiem normalnej optycznej (wektor n_o) i wynosi: $n_e - n_o = \Delta$. Światło biegnące zgodnie z kierunkiem osi optycznych nie ulega podwójnemu załamaniu. Dla tych kierunków występuje tylko refrakcja stożkowa. Jeśli światło biegnie w kryształach dwuosiowych optycznie zgodnie z kierunkiem n_o , to wartości współczynników załamania światła promieni

Dwójłomność wybranych materiałów gemmologicznych

Apatyt	0,002—0,006	Turmalin	0,018—0,020
Beryl (synt.)	0,003	Euklaz	0,019
Cyrykon (niski)	0,005	Brazylianit	0,019
Beryl	0,005—0,009	Diopsyd	0,026
Danburyt	0,006	Oliwin	0,036
Andaluzyt	0,008—0,013	Epidot	0,039
Korund	0,008	Sinhalit	0,039
Topaz	0,008	Datolit	0,044
Chryzoberyl	0,009	Benitoit	0,047
Kwarc	0,009	Dioptaz	0,053
Beryllonit	0,010	Cyrykon	do 0,059
Enstatyt	0,010	Kasyteryt	0,096
Rodonit	0,010	Azuryt	0,110
Jadeit	0,013	Tytanit	0,134
Kornerupin	0,013	Kalcyt	0,172
Sylimanit	0,015—0,021	Smitsonit	0,228
Dysten	0,015	Malachit	0,250
Fenakit	0,016	Rutyl (synt.)	0,287
Scheelit	0,016	Rutyl	0,296
Spodumen	0,016		

powstałych w wyniku podwójnego załamania wyznaczać będzie długość półosi n_α i n_β elipsy powstałej z przecięcia się elipsoidy trójosiowej z płaszczyzną prostopadłą do kierunku padania wiązki światła. Jeśli światło biegnie zgodnie z kierunkiem n_x , to analogiczne parametry promieni załamanych wyznaczać będzie położenie wektorów n_β i n_γ . Dwójłomność tych kierunków będzie określała bezwzględna różnica współczynników załamania światła, odpowiednio: $n_\beta - n_\alpha$ i $n_\gamma - n_\beta$. Dla dowolnego kierunku biegu światła w kryształach dwuosowych optycznie wartości współczynników załamania światła powstałych promieni określać będą półosie elipsy utworzonej z przecięcia się elipsoidy trójosiowej z płaszczyzną prostopadłą do kierunku padania światła — oznaczane $n_\gamma - n_\alpha = \Delta'$ i określane jako:

- n_γ , większy współczynnik załamania światła dowolnego (przypadkowego) przekroju kryształu dwuosowego optycznie,
- n_α , mniejszy współczynnik załamania światła dowolnego (przypadkowego) przekroju kryształu dwuosowego optycznie,
- Δ' , dwójłomność dowolnego (przypadkowego) przekroju kryształu dwuosowego optycznie.

Podawane w podręcznikach mineralogicznych wartości współczynników załamania światła, dwójłomności oraz kąta osi optycznych oznaczają maksy-

malne możliwe wartości tych parametrów dla danego minerału. Symbol $2V$ oznacza w tych podręcznikach wartość kąta osi optycznych zawierającego pierwszą dwusieczną, a znaczek przy symbolu kąta (γ lub α) daje jednoznaczną informację o znaku optycznym minerału:

- dodatnim, gdy symbol kąta osi optycznych ma postać $2V_{\gamma}$,
- ujemnym, gdy symbol kąta osi optycznych ma postać $2V_{\alpha}$.

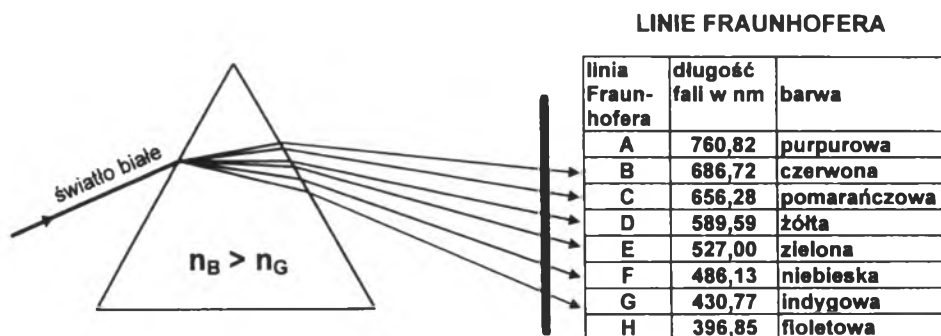
Znajomość własności indykatrysy i zasad konstrukcji Fresnela jest koniecznym minimum w posługiwaniu się optycznymi metodami identyfikacji kryształów.

Jak już wspomniano, prędkość rozchodzenia się światła w ośrodku zależy od długości fali świetlnej. W rezultacie w środowisku krystalicznym współczynniki załamania światła zmieniają się wraz ze zmianą długości fali użytego światła, przy czym zmiana ta jest inna dla każdego z promieni powstałych w wyniku podwójnego załamania. Tego rodzaju zmianę wartości współczynników załamania światła określa się mianem **dyspersji światła** w kryształach. Polega ona na zależności prędkości rozchodzenia się fal świetlnych w kryształach od barwy użytego światła monochromatycznego.

Jeżeli w kryształach dłuższe fale przemieszczają się z większą prędkością niż fale krótsze, to zachodzi **normalna dyspersja światła**. W sytuacji przeciwnej mamy do czynienia z **anormalną dyspersją**.

Dyspersję wyraża się zwykle zależnością współczynnika załamania od długości fali elektromagnetycznej użytego światła ($n = f\{\lambda\}$), gdyż współczynnik załamania światła danego ośrodka jest bezpośrednim wynikiem porównania prędkości fali elektromagnetycznej w próżni i w badanym ośrodku. Już D. F. J. Arago (1786—1853) wykazał, że dyspersja światła w próżni nie istnieje, tzn. fale elektromagnetyczne widma widzialnego rozchodzą się ze stałą prędkością bliską 300 tys. km/s.

Ponieważ za pomocą linii Fraunhofera da się dokładnie ustalić położenie określonej barwy w widmie, można więc mówić o współczynniku załamania dla światła odpowiadającego różnym liniom Fraunhofera (rys. 73). Współczynniki



Rys. 73. Widmo widzialne fal świetlnych (wg Łapota, 1995)

te oznacza się stosownie do uwzględnionych linii literami kodu Fraunhofera. Miarą dyspersji jakiegoś środowiska zatem będzie:

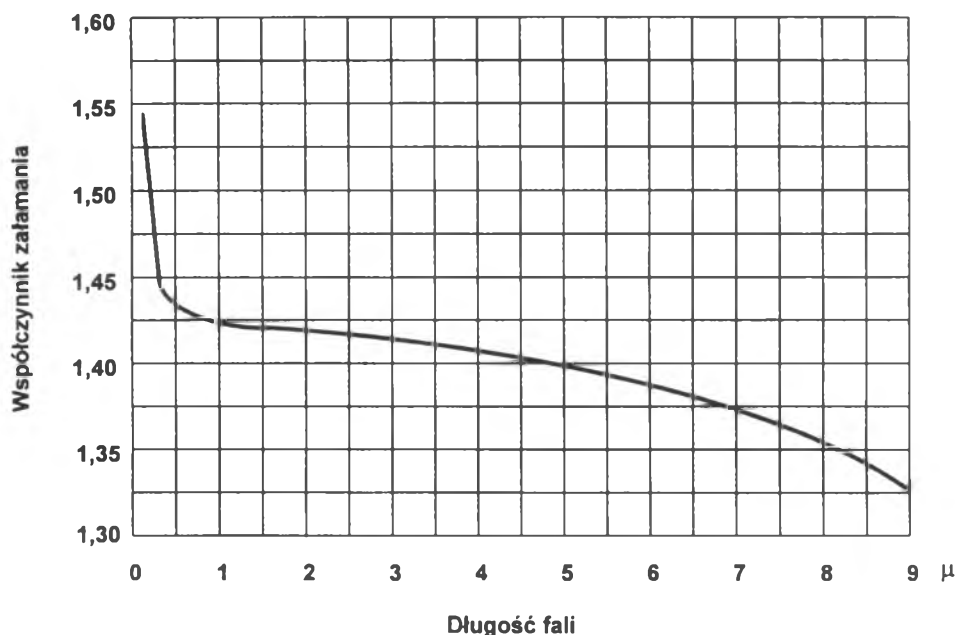
$$n_F - n_C = \Delta n,$$

czyli różnica współczynników załamania dla linii F i C kodu Fraunhofera.

Zdolność załamania światła określonego środowiska charakteryzuje się na ogół współczynnikiem załamania dla linii D_1 Fraunhofera, czyli dla żółtej linii sodu ($n_{D_1} \cong n_D$). W rezultacie zdolność rozszczepiająca względna, czyli tzw. **dyspersyjność względna** określonego środowiska, będzie się wyrażała stosunkiem:

$$(n_F - n_C) / (n_D - 1) = \Delta n / (n_D - 1) = v.$$

Zdolności dyspersyjne środowisk nie idą w parze ze zdolnościami łamiącymi (por. tab. 10 i 11). Zależność współczynnika załamania światła od długości fali użytego światła można przedstawić za pomocą tzw. **krzywej dyspersji**, którą otrzymuje się, odkładając na osi odciętych długość fali, a na osi rzędnych współczynniki załamania (rys. 74). Krzywą taką można również wyliczyć, korzystając z elektronowej teorii materii, według której fakt, iż światło w środowiskach materialnych biegnie z inną prędkością niż ma to miejsce w próżni, spowodowany jest nakładaniem się i interferowaniem fali podstawowej (biegnącej pomiędzy atomami zawsze z tą samą prędkością) i fal elementarnych pochodzących od atomów, których elektrony pod wpływem fali



Rys. 74. Krzywa dyspersji normalnej (dla fluorytu)

Współczynnik załamania światła wybranych materiałów gemmologicznych

Material	Anizotropowy	Izotropowy
Rutyl (nat. i synt.)	2,616—2,903	
Anataz	2,493—2,554	
Diament		2,417
Fabulit		2,409
Sfaleryt		2,370
Cyrkon		2,150 ($\pm 0,03$)
GGG		1,970 ($\pm 0,06$)
Cynkit	2,013—2,029	
Kasyteryt	1,997—2,093	
Cyrkon (wysoki)	1,925—1,984	
Scheelit	1,918—1,934	
Tytanit	1,900—2,034	
Cyrkon (średni)	1,875—1,905	
Andradyt		1,875 ($\pm 0,02$)
YAG		1,833
Cyrkon (niski)	1,810—1,815	
Spesssartyn		1,810 ($\pm 0,01$)
Gahnit		1,800
Almandyn		1,790 ($\pm 0,03$)
Korund (nat. i synt.)	1,762—1,770	
Rodolit		1,760 ($\pm 0,01$)
Ganospinel		1,760 ($\pm 0,02$)
Benitoit	1,757—1,804	
Pirop		1,764 ($\pm 0,02$)
Chryzoberyl	1,746—1,755	
Chryzoberyl (synt.)	1,742—1,751	
Staurolit	1,736—1,746	
Grossular		1,735 ($\pm 0,02$)
Azuryt	1,730—1,840	
Spinel (synt.)		1,730 ($\pm 0,01$)
Rodonit	1,730—1,740	
Epidot	1,729—1,768	
Taaffeit	1,719—1,723	
Wezuwian	1,713—1,718	
Zoizyt	1,691—1,704	
Dumortieryt	1,678—1,689	

Material	Anizotropowy	Izotropowy
Aksynit	1,678—1,688	
Diopsyd	1,675—1,701	
Sinhalit	1,668—1,707	
Kornerupin	1,667—1,680	
Jadeit	1,660—1,680	
Malachit	1,660—1,910	
Spodumen	1,660—1,676	
Gagat		1,660 ($\pm 0,02$)
Sylimanit	1,659—1,680	
Enstatyt	1,658—1,668	
Dioptaz	1,655—1,708	
Oliwin	1,654—1,690	
Euklaz	1,654—1,673	
Fenakit	1,654—1,670	
Apatyt	1,642—1,646	
Andaluzyt	1,634—1,643	
Danburyt	1,630—1,636	
Datolit	1,626—1,670	
Turmalin	1,624—1,644	
Smitsonit	1,621—1,849	
Topaz	1,619—1,627	
Turkus (nat. i synt.)	1,610—1,650	
Lazulit	1,612—1,643	
Amblygonit	1,612—1,636	
Bakelit		1,610 ($\pm 0,06$)
Nefryt	1,606—1,632	
Brazylianit	1,602—1,621	
Odontolit	1,600—1,610	
Ekanit		1,597
Rodochrozyt	1,597—1,817	
Spinel		1,718 ($\pm 0,02$)
Dysten	1,716—1,731	
Beryl	1,577—1,583	
Beryl (synt.)	1,561—1,579	
Koral	1,560—1,570	
Labratoryt	1,559—1,568	
Hambergit	1,555—1,625	
Beryllonit	1,552—1,562	
Agalmatolit	1,550—1,60	
Skapolit	1,550—1,572	

Material	Anizotropowy	Izotropowy
Kwarc (nat. i synt.)	1,544—1,553	
Kordieryt (iolit)	1,542—1,551	
Bursztyn		1,540
Chalcedon	1,535—1,539	
Albit	1,532—1,542	
Mikroklin	1,522—1,530	
Gips	1,520—1,529	
Ortoklaz	1,518—1,526	
Leucyt		1,508
Lazuryt (lapis-lazuli)		1,500

Material	Anizotropowy	Izotropowy
Obsydian		1,500
Kalcyt	1,486—1,658	
Koral	1,486—1,658	
Sodalit		1,483
Szkło		1,440 do 1,770
Tektyt (mołdawit)		1,480
Plastik		1,460—1,700
Opal		1,450 (+ 0,02; - 0,08)
Opal (synt.)		1,440
Fluoryt		1,434

Tabela 11

Dyspersja wybranych materiałów gemmologicznych

Material	Dyspersja
Fluoryt	0,007
Szkło kwarcowe	0,010
Beryllonit	0,010
Dysten	0,011
Ortoklaz	0,012
Kwarc	0,013
Beryl	0,014
Topaz	0,014
Fenakit	0,015
Chryzoberyl	0,015
Sylimanit	0,015
Euklaz	0,016
Danburyt	0,016
Datolit	0,016
Skapolit	0,017
Turmalin	0,017
Spodumen	0,017
Korund	0,018
Kornerupin	0,019
Wezuwian	0,019
Spinel	0,020

Material	Dyspersja
Oliwin	0,020
Dioptaz	0,022
Almandyn	0,024
Rodolit	0,026
Pirop	0,027
Spessartyn	0,027
Grossular	0,028
YAG	0,028
Epidot	0,030
Cyrkon	0,038
Benitoit	0,044
Diament	0,044
GGG	0,045
Tytanit	0,051
Andradyt	0,057
Cyrkonnia	0,060
Kasyteryt	0,071
Sfaleryt	0,156
Fabulit	0,190
Rutyl (synt.)	0,330

podstawowej wykazują drgania wymuszone. Zależności fazowe są tego rodzaju, że przez superpozycję wygaszona zostaje fala podstawowa i powstaje fala wypadkowa rozchodząca się w materii już z inną prędkością. Jeżeli jedna z częstości drgań świetlnych zgadza się z jedną z częstości drgań własnych atomu, to zjawisko ulega znacznej komplikacji. Obserwujemy wówczas pochłanianie i towarzyszącą temu tzw. anormalną dyspersję.

Ośrodki wykazujące dyspersję nazywane są dyspersyjnymi. Prawie wszystkie ośrodki przezroczyste wykazują dyspersję normalną. W ośrodkach nieprzezroczystych występuje dyspersja anormalna. Jednak ośrodki przezroczyste też mogą wykazywać dyspersję anormalną w pewnych zakresach widma fal elektromagnetycznych, szczególnie w nadfiolecie i podczerwieni, w zakresie których stają się również ośrodkami nieprzezroczystymi.

Kryształy izotropowe wykazują:

- dyspersję współczynników załamania światła.

Kryształy anizotropowe jednoosiowe optycznie wykazują:

- dyspersję współczynników załamania światła ($n_F - n_C = \Delta n$),
- dyspersję dwójłomności ($\Delta n_F - \Delta n_C$).

W kryształach jednoosiowych optycznie położenie osi optycznej nie zmienia się dla różnych długości fal użytego światła i pokrywa się z osią krystalograficzną Z .

Kryształy anizotropowe dwuosiowe optycznie wykazują dyspersję:

- współczynników załamania światła,
- dwójłomności,
- kąta osi optycznych,
- płaszczyzny osi optycznych,
- asymetryczną,
- kąta wygaszania,
- zdolności refleksyjnej.

U kryształów z układu rombowego występują: dyspersja współczynników załamania światła, dyspersja dwójłomności, dyspersja kąta osi optycznych i dyspersja płaszczyzny osi optycznych. Dyspersja kąta osi optycznych i dyspersja płaszczyzny osi optycznych ujmowane są pod wspólną nazwą dyspersji rombowej.

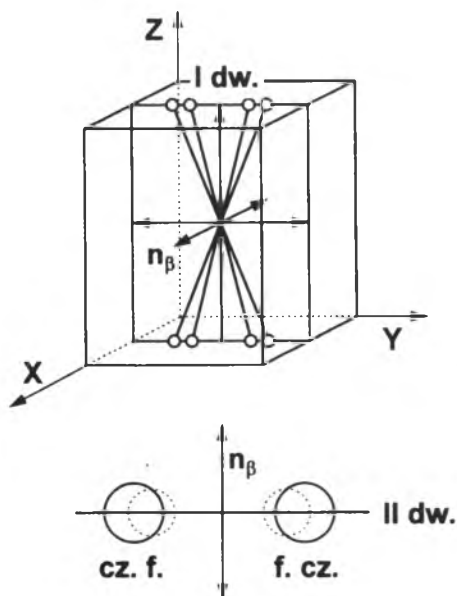
Wyróżnia się dyspersję rombową:

- symetryczną, gdy ma miejsce dyspersja kąta osi optycznych (rys. 75),
- skrzyżowaną, gdy zachodzi dyspersja płaszczyzny osi optycznych (rys. 76).

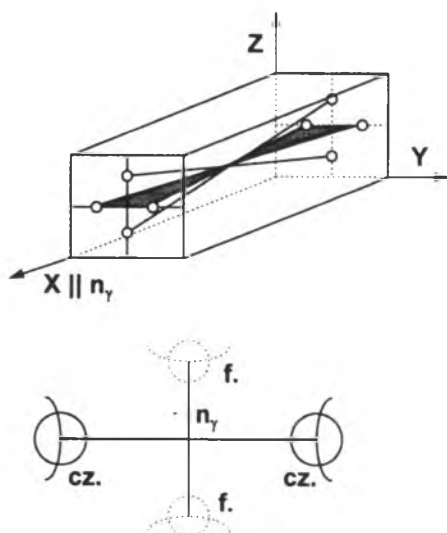
W kryształach jednoskośnych ma miejsce dyspersja współczynników załamania światła, dyspersja dwójłomności, dyspersja kąta osi optycznych i dyspersja płaszczyzny osi optycznych. Dyspersja kąta osi optycznych i dyspersja płaszczyzny osi optycznych ujmowane są pod wspólną nazwą dyspersji jednoskośnej.

Wyróżnia się dyspersję jednoskośną:

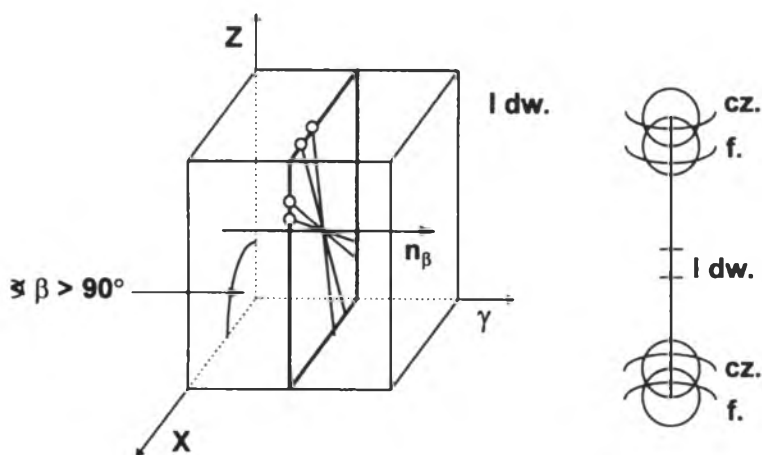
- pochyloną, gdy zachodzi dyspersja kąta osi optycznych (rys. 77),
- skrzyżowaną, gdy zachodzi dyspersja kąta osi optycznych i płaszczyzny osi optycznych (rys. 78) (dyspersja ta dotyczy kryształów jednoskośnych,



Rys. 75. Dyspersja rombowa symetryczna (wg Łapota, 1995)



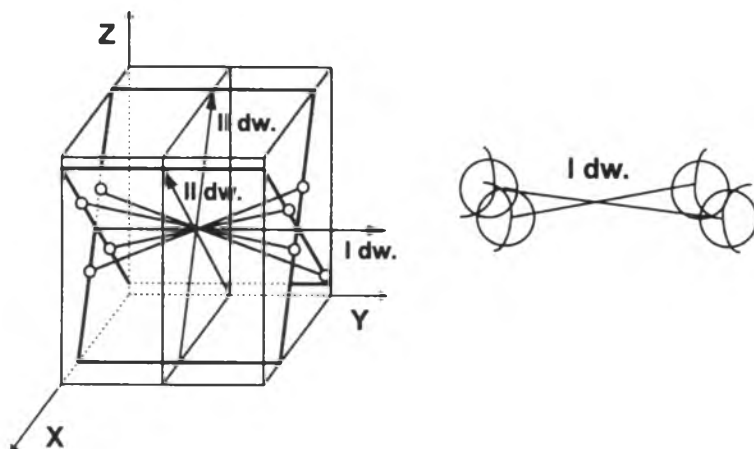
Rys. 76. Dyspersja rombowa skrzyżowana (wg Łapota, 1995)



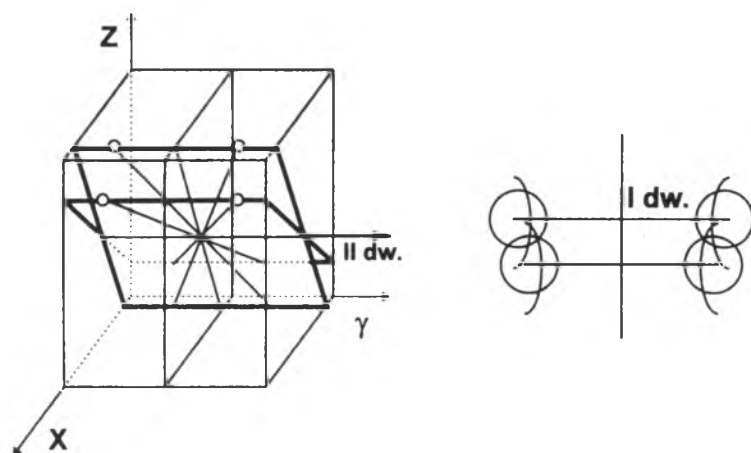
Rys. 77. Dyspersja jednoskośna pochylona (wg Łapota, 1995)

w których oś krystalograficzna Y zlewa się z pierwszą dwusieczną indyktrysy),

- poziomą, gdy zachodzi dyspersja kąta osi optycznych i płaszczyzny osi optycznych (rys. 79) (dyspersja ta dotyczy kryształów jednoskośnych, których oś krystalograficzna Y zlewa się z drugą dwusieczną indyktrysy).



Rys. 78. Dyspersja jednoskośna skrzyżowana (wg Łapota, 1995)



Rys. 79. Dyspersja jednoskośna pozioma (wg Łapota, 1995)

W kryształach trójskośnych położenie kierunków optycznych jest niezależne od kierunków krystalograficznych, choć dla różnych długości fal elektromagnetycznych ściśle określone i właściwe każdej substancji krystalizującej w tym układzie. W kryształach trójskośnych ma miejsce dyspersja wszystkich elementów symetrii optycznej, lecz nie jest ona regulowana określonymi związkami ogólnymi. Taką dyspersję uartoło się nazywać asymetryczną.

Jak już wspomniano, światło natrafiając na swej drodze na inne środowiska, ulega w części odbiciu od powierzchni granicznej. Zdolność do odbijania światła nazywa się **zdolnością refleksyjną**. Zależy ona znacząco od gładkości powierzchni, a nie zależy od jej barwy. Określana organoleptycznie nazywana jest **połyskiem**.

Na tym samym kryształe mogą występować odmienne rodzaje połysku. Dobrym przykładem może być kwarc, którego naturalne ściany kryształu mają połysk szklisty, a powierzchnie przełamu bardziej chropowate — tłusty. Szlifowanie i polerowanie pozwalają poprawić połysk. Szczególnie odnosi się to do minerałów twardszych i o wyższym współczynniku załamania światła, w których z zastosowaniem właściwej obróbki istnieje możliwość uzyskania podwyższonego połysku. Cechę tą określa się zazwyczaj poprzez subiektywne porównywanie badanego obiektu z wzorcami. W skład podstawowego zestawu wzorców wchodzi połyski:

- metaliczny, np. galeny,
- półmetaliczny, np. hematytu,
- diamentowy, np. diamentu, rutyłu, sfalerytu,
- szklisty, np. korundu, spinelu, berylu, kwarcu,
- żywiczny, np. bursztynu,
- woskowy, np. turkusu, opalu, jadeitu,
- tłusty, np. nefrytu, grossularu,
- perłowy, np. pereł; wykazują go często minerały blaszkowe i łusczkowe,
- jedwabisty, np. gipsu, azbestu; wykazują go przeważnie minerały włókniste,
- ziemisty, nazywany również zwyczajnym, np. fosforytów,
- matowy — lub określenie wyraża brak połysku.

Zdolność refleksyjna (połysk) jest uznawana za ważną cechę diagnostyczną. Oznacza się ją na ścianach kryształów naturalnych lub obrobionych szlifowaniem i polerowaniem (fasetki) oraz na świeżym przełomie, przy czym powinien być wyraźnie zaznaczony rodzaj oraz stopień obróbki powierzchni, na której dokonano oceny. W takim oznaczeniu nie uwzględnia się barwy kryształu.

Między zdolnością refleksyjną i prędkością światła w kryształach oraz jego absorpcją istnieją ściśle związki ujęte tzw. **równaniami Fresnela**. Gdy światło pada na granicę ośrodków różniących się prędkością rozchodzenia fal elektromagnetycznych, wtedy oprócz promienia załamane go powstaje również promień odbity. Kąt zawarty między normalną granicą ośrodków i kierunkiem rozchodzenia się fali odbitej nosi nazwę kąta odbicia.

Jeśli powierzchnia odbijająca światło jest płaska i odpowiednio gładka (wysokość nierówności powierzchni odbijającej światło mniejsze od długości fali użytego światła), to fala nie ulega zakłóceniu i rozpraszaniu przy odbiciu.

Gdy powierzchnia odbijająca nie jest równa, wtedy fala odbita różni się od fali padającej, ponieważ przy odbiciu zachodzi rozpraszanie. Powierzchnie chropowate odbijają padające na nie światło we wszystkich kierunkach. Ten typ odbicia światła nazywany jest dyfuzyjnym lub rozproszonym. Powierzchnie rozpraszające światło równomiernie we wszystkich kierunkach nazywane są bezwzględnie matowymi. Z rozważań teoretycznych i prac eksperymentalnych wynika, że odbicie światła od powierzchni chropowatych jest tym bliższe zwierciadlanemu, im mniejsza jest wysokość chropowatości i większy kąt padania.

Zdolność odbijająca powierzchni granicznej (R — zdolność refleksyjna), czyli stosunek natężenia światła odbitego (I_o) do natężenia światła padającego (I_p):

$$R = I_o/I_p,$$

zależy niekiedy bardzo silnie od długości fali użytego światła.

Stosunek ten może być wyrażony w procentach:

$$R = I_o/I_p 100\%.$$

W metalach występuje selektywne odbicie światła związane z absorpcją przez metal pewnej długości fali elektromagnetycznej, co przejawia się charakterystycznym zabarwieniem metalu.

Gdy światło pada prostopadłe (kąt padania $\alpha = 0$) na granicę ciała izotropowego pochłaniającego równomiernie i nieznacznie składowe widma świetlnego (niska absorpcja), wówczas natężenie promienia odbitego nie zależy od kierunku drgań względem płaszczyzny padania wiązki padającej i odbitej. Zdolność refleksyjna jest wtedy funkcją współczynnika załamania światła ośrodka odbijającego i ma postać:

$$R = [(n - 1)/(n + 1)]^2,$$

gdzie:

- R — zdolność refleksyjna ośrodka,
- n — współczynnik refrakcji tego ośrodka.

Przykładowo dla szkła ($n = 1,5$) zdolność refleksyjna wynosi 0,04. Oznacza to, że na granicy powietrza i szkła odbiciu ulega 4% energii światła padającego. Z innych przykładów wynika, że kryształy o $n > 1$ odbijają światło tym silniej, im wyższy jest ich współczynnik załamania światła, np.: sfaleryt — $n = 2,4$ i $R = 0,17$; pirop — $n = 1,7$ i $R = 0,07$; kwarc — $n = 1,55$ i $R = 0,045$.

Dla kryształów silnie absorbujących światło konieczne jest uwzględnienie współczynnika absorpcji (K). Zdolność refleksyjna takich ciał wyraża się wzorem:

$$R = [(n - 1)^2 + n^2 K^2]/[(n + 1)^2 + n^2 K^2],$$

gdzie:

- R — zdolność refleksyjna ośrodka,
- n — współczynnik refrakcji ośrodka,
- K — współczynnik absorpcji (pochłaniania) światła przez ośrodek.

Zdolność refleksyjna ciał o jednakowych współczynnikach załamania światła jest tym większa, im silniejsza jest absorpcja światła. Toteż kryształy nieprzezroczyste odbijają światło silniej niż kryształy przezroczyste o takim samym współczynniku załamania światła.

Wzory Fresnela mają inną postać w przypadku, gdy drgania wektora fali elektromagnetycznej światła padającego zachodzą równolegle (II), a inną, gdy drgania tego wektora zachodzą prostopadłe (\perp) do płaszczyzny padania wyznaczonej przez promień padający (α), odbity i załamany (β):

$$R_{\perp} = [\sin^2(\alpha - \beta)]/[\sin^2(\alpha + \beta)],$$

$$R_{\parallel} = [\operatorname{tg}^2(\alpha - \beta)]/[\operatorname{tg}^2(\alpha + \beta)],$$

gdzie:

R — stosunek natężenia promienia odbitego do natężenia promienia padającego.

W kryształach optycznie anizotropowych zdolność refleksyjna zależy od kierunku. Z tego też względu połysk takich kryształów zależy często znacząco od orientacji płaszczyzny odbijającej światło względem głównych kierunków optycznych kryształu.

Zdolność refleksyjną można odwzorować za pomocą powierzchni bądź to jednopowłokowych, bądź to dwupowłokowych.

Zdolność refleksyjną kryształów regularnych odwzorowuje kula. Dla kryształów przezroczystych z układu regularnego (słabo absorbujących światło) zdolność refleksyjną obrazuje kula o promieniu:

$$R = (n - 1)^2/(n + 1)^2.$$

Ten sam parametr dla kryształów regularnych nieprzezroczystych (silnie absorbujących światło) przedstawia kula o promieniu:

$$R = [(n - 1)^2 + n^2 K^2]/[(n + 1)^2 + n^2 K^2].$$

Zdolność refleksyjną kryształów jednoosiowych optycznie odwzorowuje elipsoida obrotowa o półosiach:

$$R_{\omega} = [(n_{\omega} - 1)/(n_{\omega} + 1)]^2,$$

$$R_e = [(n_e - 1)/(n_e + 1)]^2 \text{ — w kryształach przezroczystych,}$$

$$R_{\omega} = [(n_{\omega} - 1)^2 + n_{\omega}^2 K_{\omega}^2]/[(n_{\omega} + 1)^2 + n_{\omega}^2 K_{\omega}^2],$$

$$R_e = [(n_e - 1)^2 + n_e^2 K_e^2]/[(n_e + 1)^2 + n_e^2 K_e^2] \text{ — w kryształach nieprzezroczystych.}$$

Elipsoida obrotowa zdolności refleksyjnej kryształów jednoosiowych optycznie jest wpisana w bryłę geometryczną kryształu tak samo jak indyktrysa takiego kryształu. Kryształy jednoosiowe optycznie o zdolności refleksyjnej:

$R_i > R_{\omega}$ są nazywane dodatnimi, a

$R_e < R_{\omega}$ — ujemnymi.

88 Zdolność refleksyjną kryształów dwuosiowych optycznie odwzorowuje w przybliżeniu elipsoida trójosiowa o półosiach:

$$R_z = [(n_z - 1)/(n_z + 1)]^2,$$

$$R_\beta = [(n_\beta - 1)/(n_\beta + 1)]^2,$$

$$R_\gamma = [(n_\gamma - 1)/(n_\gamma + 1)]^2 \text{ — w kryształach przezroczystych,}$$

oraz

$$R_x = [(n_x - 1)^2 + n_x^2 K_x^2] / [(n_x + 1)^2 + n_x^2 K_x^2],$$

$$R_\beta = [(n_\beta - 1)^2 + n_\beta^2 K_\beta^2] / [(n_\beta + 1)^2 + n_\beta^2 K_\beta^2],$$

$$R_\gamma = [(n_\gamma - 1)^2 + n_\gamma^2 K_\gamma^2] / [(n_\gamma + 1)^2 + n_\gamma^2 K_\gamma^2] \text{ — w kryształach nieprzezroczystych.}$$

Zdolność refleksyjna jest indywidualną cechą minerałów i ma duże znaczenie diagnostyczne. Cechę tę określa się w praktyce najczęściej empirycznie, procentowo, zależnie od długości używanego światła monochromatycznego. W wielu wypadkach zadowalające jest określenie przybliżonej wartości tego parametru. Uzyskuje się to przez porównanie z wzorcem (z wykorzystaniem refraktometru). Dokładniejszą ocenę zdolności refleksyjnej można osiągnąć, stosując pomiar fotometryczny. Wtedy błąd pomiaru ograniczony jest do około 5—10%. Najdokładniejsze wyniki daje zastosowanie ogniwa fotoelektrycznego kalibrowanego wzorcem. Błąd takiego pomiaru nie przekracza 0,5%.

Zdolność refleksyjna minerałów anizotropowych zależy od kierunku padania wiązki światła. Wraz ze zmianą kierunku padania światła zaznacza się zmiana natężenia odbitego światła.

Różnica natężeń światła odbitego została określona przez analogię do dwójłomności mianem dwójdobicia (pleochroizmu refleksyjności) i oznaczona symbolem ΔR .

Dwójdobicie kryształów jednoosiowych przezroczystych wyraża się wzorem:

$$\Delta R = R_t - R_o.$$

Może ono mieć wartość dodatnią lub ujemną. W kryształach jednoosiowych dodatnich optycznie ma ono wartość dodatnią, a w kryształach ujemnych — wartość ujemną.

Dwójdobicie kryształów dwuosiowych optycznie przezroczystych wyraża się wzorem:

$$\Delta R = R_\gamma - R_x.$$

Aby określić dwójdobicie kryształów nieprzezroczystych, konieczne jest uwzględnienie dwójabsorpcji światła, która wynosi odpowiednio:

$$\Delta K_t = K_e - K_o \text{ — w kryształach nieprzezroczystych jednoosiowych,}$$

$$\Delta K_{11} = K_\gamma - K_x \text{ — w kryształach nieprzezroczystych dwuosiowych.}$$

Dwójdobicie wywołuje zmianę barwy kryształów optycznie anizotropowych obserwowanych przez jeden polaroid.

Wizualna ocena dwójdobicia dobrze się zgadza z obliczonymi wartościami względnego dwójdobicia (Δr), a mniej z obliczoną wartością dwójdobicia (ΔR).

W kryształach jednoosiowych optycznie względne dwójodobicie jest określone wzorem:

$$\Delta r = [2 \Delta R / (R_e - R_o)] \times 100,$$

a w kryształach dwuosiowych optycznie:

$$\Delta r = [2 \Delta R / (R_y - R_x)] \times 100.$$

Zdolność refleksyjna kryształów pozostaje w dość ścisłym związku ze współczynnikiem refrakcji, np.:

- minerały przezroczyste o zdolności refleksyjnej $R = 2\text{—}10\%$ mają współczynniki refrakcji zawarte w przedziale $n = 1,3\text{—}1,9$,
- minerały przezroczyste o zdolności refleksyjnej $R = 10\text{—}29\%$ mają współczynniki refrakcji zawarte w przedziale $n = 1,9\text{—}3,2$,
- minerały nieprzezroczyste o zdolności refleksyjnej $R = 2\text{—}9\%$ mają współczynniki refrakcji zawarte w przedziale $n = 1,3\text{—}1,85$,
- minerały nieprzezroczyste o zdolności refleksyjnej $R = 9\text{—}20\%$ mają współczynniki refrakcji zawarte w przedziale $n = 1,85\text{—}2,40$,
- minerały nieprzezroczyste o zdolności refleksyjnej $R = 20\text{—}95\%$ mają współczynniki refrakcji zawarte w przedziale $n > 2,40$.

3.4.2.1. Refraktometr

Pomiar współczynnika załamania światła za pomocą refraktometru opiera się na zjawisku całkowitego wewnętrznego odbicia światła podczas przechodzenia fali ze środowiska bardziej załamującego światło do środowiska mniej załamującego. Zjawisko to występuje wówczas, gdy fala pada na granicę środowisk pod kątem większym niż graniczny.

Z użyciem refraktometru można określić w obiekcie gemmologicznym:

- współczynnik lub współczynniki załamania światła,
- przynależność do grupy optycznej (izotropowych lub anizotropowych, jednoosiowych lub dwuosiowych, dodatnich lub ujemnych optycznie),
- dwójłomność,
- kierunek lub kierunki osi optycznych,
- dyspersję.

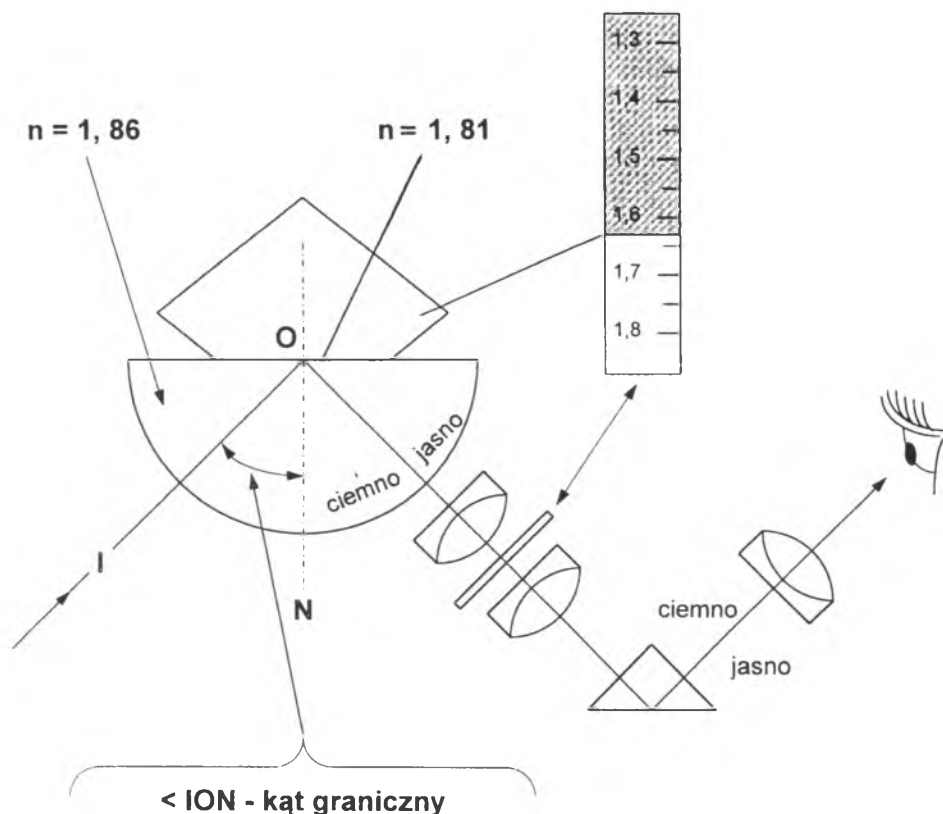
Zasadniczymi częściami składowymi refraktometru są:

- Oszlifowana półkula lub pryzmat wykonane ze szkła o bardzo wysokim współczynniku załamania światła, np. flint (szkło ołowiowe) o $n = 1,89$. Badane ciało umieszcza się na płaskiej powierzchni półkuli, przy czym między ciałem i półkulą musi się znajdować warstewka cieczy kontaktowej o współczynniku załamania światła pośrednim między wartością współ-

czynnika załamania światła materiału, z którego wykonana jest półkula, i materiału tworzącego badany obiekt. Jako cieczy kontaktowej powszechnie używa się tzw. cieczy Andersona o współczynniku załamania światła $n \cong 1,81$, która zawiera jodek metylenu CH_2J_2 (~ 75% obj.), siarkę rodzimą S (~ 15% obj.) i tetrajodek metylenu C_2J_4 (~ 10% obj.).

- Skala z podziałką wycechowaną jednostkami współczynnika załamania światła.
- Okular o niewielkim powiększeniu poprawiający warunki obserwacji skali. Przeważnie bywa on wyposażony w nakładany filtr polaryzacyjny, który wykorzystywany jest do eliminacji jednego z promieni świetlnych powstałych w wyniku podwójnego załamania światła w obiektach anizotropowych i ułatwia odczyt współczynników refrakcji obiektów o niskiej dwójłomności.
- Soczewki i zwierciadła płaskie kierujące strugę światła do okularu.

Refraktometr jest oświetlany wiązką światła biegnącą od strony wypukłej powierzchni półkuli (rys. 80). W wizjerze ustawionym na drodze promieni odbitych od badanego ciała obserwujemy granicę pola ciemnego i jasnego. Z odczytu położenia tej granicy na skali kątowej określa się wartość kąta



Rys. 80. Bieg światła w refraktometrze gemmologicznym (wg Reada, 1991)

granicznego bądź też bezpośrednio wartość współczynnika lub współczynników załamania światła badanego ciała, o ile skala przyrządu jest wycechowana w myśl wzoru:

$$n = N \sin G,$$

gdzie:

- n — wartość współczynnika załamania światła badanego obiektu, np. kamienia jubilerskiego,
- G — wartość kąta granicznego,
- N — bezwzględny współczynnik załamania światła szkła, z którego wykonano półkulę refraktometru.

Postępując w taki sposób można zmierzyć współczynniki refrakcji obiektu dla wszystkich kierunków leżących w płaszczyźnie powierzchni półkuli refraktometru. Jeśli zachodzi potrzeba pomiaru współczynników załamania światła w innych płaszczyznach, to powinny one zostać ustawione równolegle do płaskiej powierzchni półkuli refraktometru.

W pracy z refraktometrem należy pamiętać o tym, że:

- Obiekt poddawany oznaczeniom powinien mieć badaną powierzchnię wypolerowaną i oczyszczoną. Służy do tego specjalny płyn dołączany przez wytwórcę refraktometru.
- Do oznaczeń nie nadają się zbyt małe fasetki (ścianki obiektu szlifowanego).
- Półkulę lub pryzmat refraktometru wykonano ze szkła o mniejszej twardości niż twardość wielu oznaczanych refraktometrycznie obiektów. Powierzchnia ta, w zetknięciu z twardymi narożami i krawędziami obiektu, narażona jest na zarysowanie, a poprawne wyniki pomiarów uzyskuje się tylko wówczas, gdy polerowana powierzchnia robocza stolika refraktometru zachowuje swoje pierwotne parametry.
- Obiekt umieszcza się na stoliku roboczym refraktometru pincetą. Tylko duże obiekty, tj. o wielkości powyżej 5 karatów, mogą być umieszczane na stoliku refraktometru bezpośrednio, np. palcami.
- Po dokonaniu oznaczenia resztki cieczy kontaktowej powinny być starannie usunięte. Zapobiega to nadtrawianiu powierzchni roboczej stolika refraktometru i pojawianiu się niekorzystnego nalotu.
- Należy przestrzegać podawanych w instrukcji obsługi warunków oświetlenia przyrządu. Do oświetlenia refraktometru używa się najczęściej światła monochromatycznego o długości fali $\lambda = 539,3$ nm (światło żółte), które jest emitowane przez tzw. lampę sodową. W wielu refraktometrach gemmologicznych stosuje się oświetlenie światłem białym, a na drodze promieni ustawia się filtr świetlny przepuszczający światło monochromatyczne żółte.

Praktyczne badanie na refraktometrze polega na:

- ① Sprawdzeniu stanu stolika roboczego refraktometru i usunięciu ewentualnych zanieczyszczeń (za pomocą specjalnego płynu dostarczanego lub zalecanego przez producenta refraktometru).

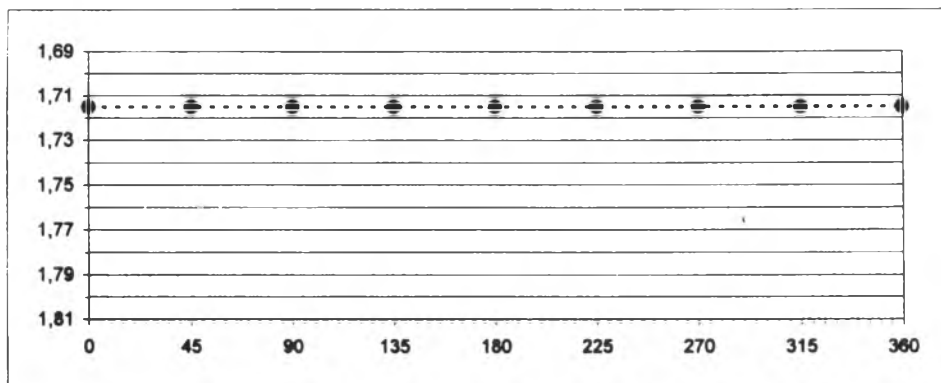
- ② Oczyszczeniu polerowanej powierzchni obiektu poddawanego oznaczeniom (za pomocą specjalnego płynu dostarczanego lub zalecanego przez producenta refraktometru).
- ③ Nałożeniu niewielkiej kropli cieczy kontaktowej na stolik roboczy refraktometru.
- ④ Umieszczeniu badanego obiektu na stoliku roboczym refraktometru w taki sposób, by przewidziana do oznaczeń fasetka stykała się z powierzchnią stolika refraktometru za pośrednictwem cieczy kontaktowej.
- ⑤ Obserwacji na skali okularu granicy lub granic obszarów ciemnego i jasnego.
- ⑥ Odczytaniu ze skali widocznej w okularze refraktometru wartości współczynnika załamania światła odpowiadającej lub odpowiadających granicy lub granicom obszaru, lub obszarów ciemnego i jasnego.

Wykonując refraktometrem serię pomiarów wartości współczynników załamania światła w stopniowo rotowanym przekroju obiektu (zwykle stosuje się interwał 45° lub 30°), można wykreślić krzywe ich zmian (rys. 81). Graficzny obraz ich zmienności pozwala precyzyjnie śledzić naturę optyczną badanego obiektu. Uzyskane wyniki można odnieść do modelu przestrzennego kryształu.

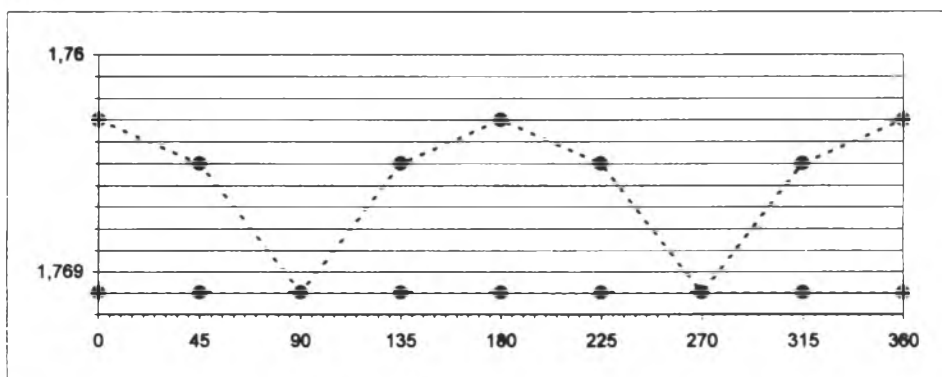
Posługując się źródłem światła monochromatycznego, za pomocą refraktometru uzyskuje się wiele informacji o naturze optycznej obiektu gemmologicznego (np. metodą graficzną opracowaną przez B.W. Andersona). Między innymi można stwierdzić, że obiekty:

- Izotropowe optycznie (amorficzne lub krystalizujące w układzie regularnym) wykazują tylko jedną granicę światło/cień i nie zmieniają jej położenia podczas rotacji na płaszczyźnie stolika roboczego refraktometru (rys. 81a).
- Jednoosiowe optycznie (trygonalne, tetragonalne i heksagonalne) ujawniają obecność dwu granic światło/cień. Jedna z nich, odnosząca się do promienia nadzwyczajnego, będzie zmieniała położenie względem nieruchomej granicy światło/cień odnoszącej się do promienia zwyczajnego (rys. 81b). Największa różnica obu współczynników załamania światła określi dwójłomność obiektu. Gdy współczynnik załamania światła promienia nadzwyczajnego będzie wyższy od współczynnika załamania światła promienia zwyczajnego, wówczas będzie to kryształ dodatni optycznie, w sytuacji przeciwnej — ujemny optycznie. Jeśli obiekt optycznie jednoosiowy jest ustawiony prostopadłe osią optyczną do powierzchni stolika roboczego refraktometru, to podczas obrotu obiektem obserwuje się granice światła/cienia, które nie zmieniają swego położenia (rys. 82a). W przypadku odchylenia osi optycznej od prostopadłości względem płaszczyzny roboczej refraktometru będą widoczne granice światło/cień, które podczas obrotu obiektem będą zmieniały swe położenie w sposób zauważalny. Gdy obiekt będzie przecięty równolegle do osi optycznej, wówczas w położeniu, gdy oś optyczna obiektu leży w płaszczyźnie padania wiązki światła, obie granice światło/cień zleją się, a po obrocie o kąt prosty wykażą największą różnicę odchylenia wzajemnego, czyli największą możliwą w takim kryształcie dwójłomność (rys. 82a).

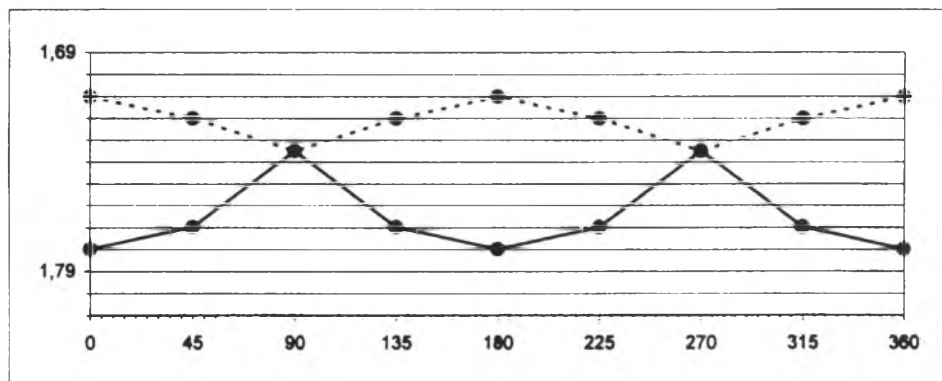
a



b

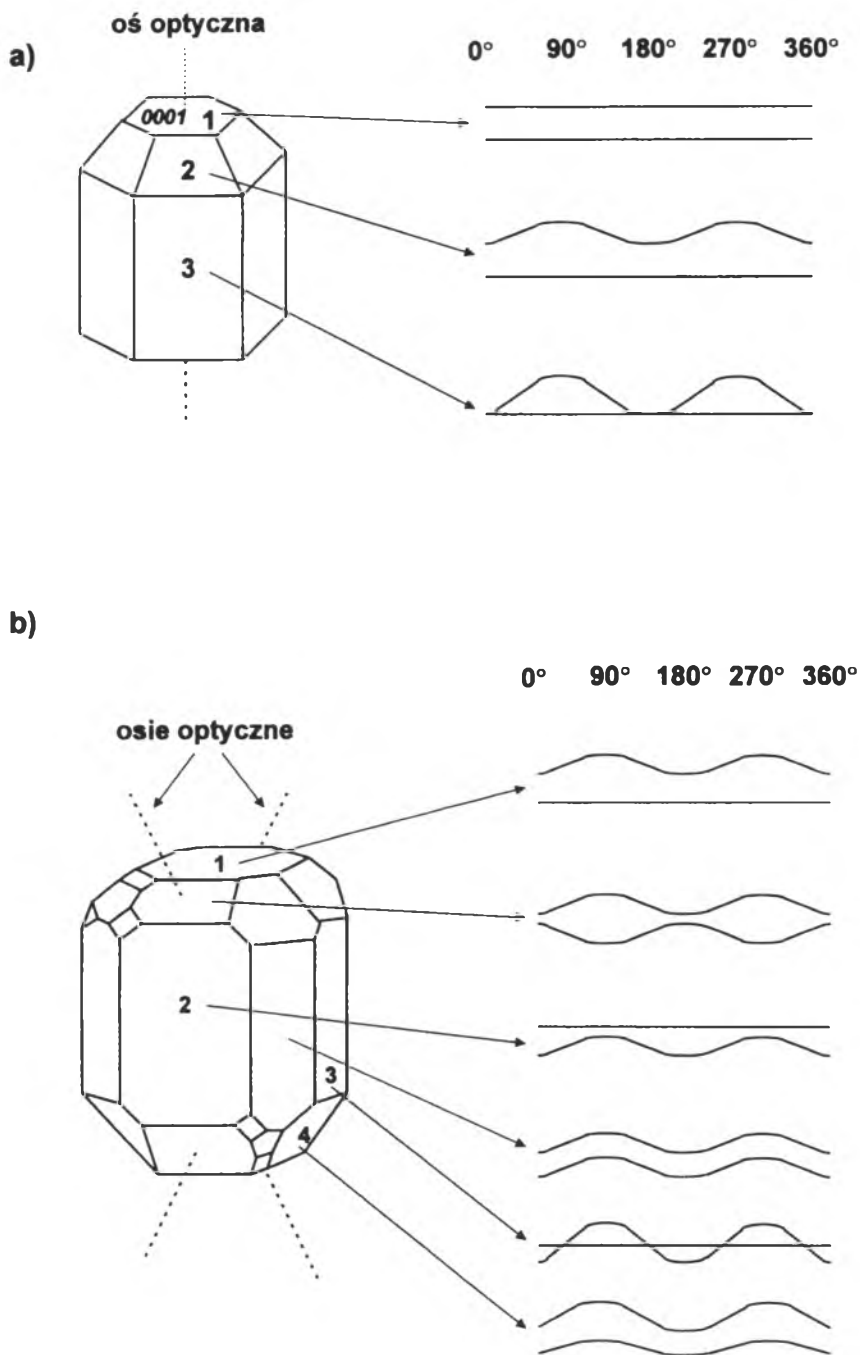


c



Rys. 81. Krzywe zmiany wartości współczynników załamania światła obiektów gemmologicznych w czasie rotacji na stoliku refraktometru (wg Duroc-Dannera, 1996)

a — obiekt izotropowy, b — obiekt anizotropowy, jednoosiowy, optycznie ujemny, c — obiekt anizotropowy, dwuosiowy, optycznie dodatni



Rys. 82. Prezentacja wyników pomiaru refraktometrem współczynników załamania światła na różnych ścianach kryształów (wg J. M. Duroc-Dannera, 1996)

a) anizotropowych jednoosiowych (kryształ z układu heksagonalnego), *b)* anizotropowych dwuosiowych (kryształ z układu rombowego)

- Dwuosiowe optycznie (rombowe, jednoskośne, trójskośne) ujawniają obecność dwu granic światło/cień odnoszących się do promieni powstałych w wyniku podwójnego załamania światła w obiekcie (rys. 81c). Rotując obiekt na stoliku roboczym refraktometru, można otrzymać wykres zmienności wartości współczynników załamania światła i oznaczyć maksimum i minimum odchylenia obu granic; wartość największa odpowiada n_y , a najmniejsza n_x ; wartość pośrednia jest współczynnikiem n_β ; różnica między ekstremalnymi wartościami współczynnika załamania światła określa dwójłomność obiektu anizotropowego optycznie w myśl równania:

$$n_y - n_x = \Delta.$$

Jeśli n_β ma wartość bliższą n_x , to jest to kryształ optycznie dodatni. Jeśli n_β ma wartość bliższą n_y , to jest to kryształ optycznie ujemny. To samo oznaczenie można przeprowadzić metodą średnich. W tym celu należy wykonać kilkanaście pomiarów (minimum 12) położenia granic światło/cień w obiekcie rotowanym o ustalony interwał kątowy, np. 15° , 30° i obliczyć z nich średnią arytmetyczną. Następnie wylicza się bezwzględną różnicę pomiędzy najwyższą odczytaną wartością współczynnika załamania światła (tzw. n_{\max}) a obliczoną uprzednio średnią arytmetyczną (n_{sr}). Analogicznie oblicza się bezwzględną różnicę pomiędzy najniższą odczytaną wartością współczynnika załamania światła (tzw. n_{\min}) i obliczoną wcześniej średnią arytmetyczną (n_{sr}). Jeśli

$n_{\max} - n_{\text{sr}} < n_{\text{sr}} - n_{\min}$, to obiekt jest optycznie ujemny, a jeśli

$n_{\max} - n_{\text{sr}} > n_{\text{sr}} - n_{\min}$, to obiekt jest optycznie dodatni.

W pomiarach refraktometrycznych kryształów dwuosiowych można natrafić na taką orientację płaszczyzny pomiaru względem osi optycznych, że otrzymany rezultat będzie ładnie podobny do wykresu zmienności współczynnika załamania światła kryształów jednoosiowych optycznie (rys. 82b). Sytuacja taka ma miejsce wtedy, gdy fasetka badana refraktometrycznie usytuowana jest prostopadle do płaszczyzny osi optycznych.

- O strukturze kryptokrystalicznej — złożone z drobnych kryształów rozmieszczonych mniej lub bardziej bezładnie — dają refraktometrycznie zwykle pojedynczą granicę światło/cień. Jest to granica niezbyt ostra, uśredniona — wypadkowa orientacji sumy kryształów. Jednak spotykane są przypadki, gdy kamienie polikrystaliczne dają podwójną granicę światło/cień, a jej położenie nie zmienia się mimo dokonywanej rotacji obiektem na stoliku roboczym refraktometru. Zjawisko takie nazywa się strukturalną dwójłomnością i uwarunkowane jest sumarycznym efektem orientacji agregujących w obiekcie kryształów dwóch różnych substancji lub dwóch różnych stanów tej samej substancji, np. chalcedonu w opalu.

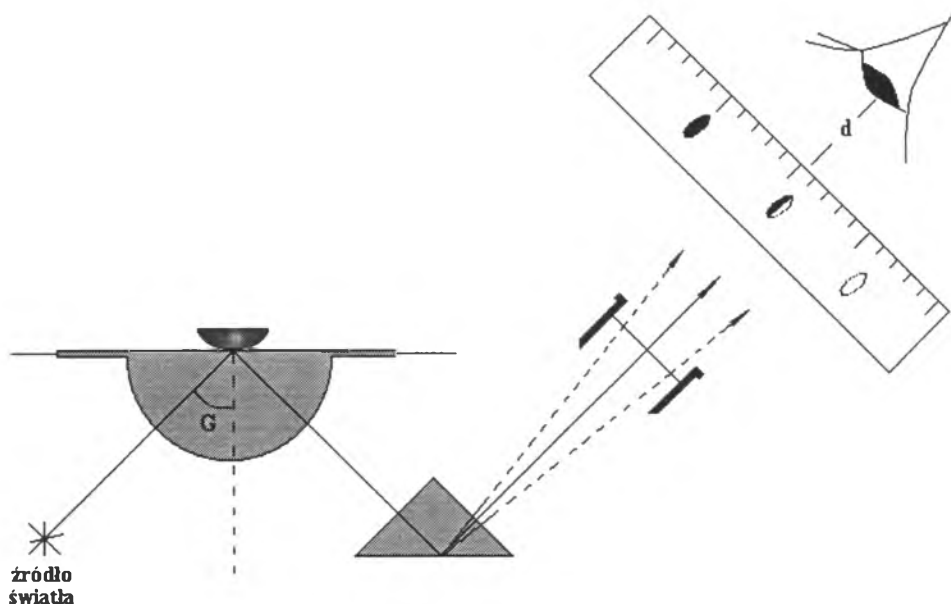
Podczas obserwacji refraktometrycznych różnych obiektów gemmologicznych może się zdarzyć, że na skali refraktometru obszar zaciemniony nie będzie

widoczny. Oznaczać to może, że współczynnik załamania światła badanego obiektu jest wyższy lub niższy od wartości objętych skalą refraktometru. Najczęściej użytkowane refraktometry gemmologiczne pozwalają na oznaczenie współczynników załamania światła w przedziale 1,3—1,8.

W odczytywaniu wartości współczynników załamania światła na skali refraktometru bardzo pomocny jest filtr polaryzacyjny. Pozwala on eliminować odpowiednio do swego położenia jeden z promieni świetlnych powstałych w wyniku podwójnego załamania światła w obiekcie dwójłomnym (anizotropowym). Jest to szczególnie przydatne w sytuacjach, gdy ma się do czynienia z przekrojem o niskiej dwójłomności.

Kaboszony i obiekty bardzo małe nie dają w wizjerze refraktometru żadnego zaciemnienia. Metodykę pomiaru współczynników załamania światła takich kamieni opracował Lester Benson z Amerykańskiego Instytutu Gemmologicznego (GIA). Jest on trudniejszy i mniej precyzyjny od standardowego pomiaru refraktometrycznego. Procedura L. Bensona, czyli tzw. **metoda obserwacji dystansowej** polega na użyciu do wykonania takiego pomiaru możliwie małej ilości cieczy kontaktowej, której niezbędną, lecz minimalną ilość można ustalić metodą „prób i błędów”. Tak niewielką ilość cieczy kontaktowej nanosi się na stolik roboczy refraktometru igłą lub kapilarą. Następnie kaboszon ustawia się w centrum stolika roboczego refraktometru, przy czym naniesiona kropla cieczy kontaktowej nie powinna się zbyt powiększyć, łącząc obiekt ze stolikiem. Oddalając oko na odległość dobrego widzenia (około 25—30 cm) od wizjera refraktometru i lekko unosząc głowę, należy znaleźć takie położenie, w którym będzie można zobaczyć punkt zetknięcia się kamienia i kropki cieczy kontaktowej w postaci małego dysku kontaktowego w centrum skali dostrzegalnej jeszcze z tej odległości. Jeśli skupi się uwagę na tym dysku, to wskaźniki skali nie będą już ostro widoczne. Poprzez lekkie boczne ruchy głowy można jednak ustalić położenie dysku dostatecznie dokładnie. Można zauważyć, że jeśli dysk kontaktowy widzi się przy oznaczeniu skali, które odpowiada wartości niższej od współczynnika załamania badanego kaboszonu, to jest on ciemny. Przy stopniowym przemieszczaniu pola widzenia ku coraz to wyższym wartościom współczynnika załamania światła w pewnym momencie dysk kontaktowy stanie się rozjaśniony wskutek całkowitego wewnętrznego odbicia. Można znaleźć takie położenie, przy którym dysk kontaktowy będzie leżał dokładnie na granicy obszaru zaciemnionego i rozjaśnionego. Wskaźnik skali pokaże wtedy wartość współczynnika załamania światła badanego kaboszonu (rys. 83). Aby uzyskać większą dokładność oznaczeń, pomiar powtarza się kilkakrotnie, a z otrzymanych wartości oblicza się średnią arytmetyczną.

Standardowe refraktometry gemmologiczne pozwalają oznaczyć wartość współczynnika załamania światła obiektów, gdy nie przekracza ona wartości 1,8. Uwarunkowane jest to głównie dostępnością cieczy kontaktowych o odpowiednio wysokim współczynniku załamania światła. Tylko nieliczne obiekty naturalne przekraczają tę granicę. Jednak w ostatnich latach pojawiło się wiele materiałów syntetycznych o wysokim współczynniku załamania światła, jak



Rys. 83. Refraktometryczny pomiar współczynnika załamania światła kaboszonu (wg Reada, 1991)

d — odległość oka od skali refraktometru (około 25 cm)

tytanian strontu, kubiczny tlenek cyrkonu. Współczynnik załamania światła tych materiałów mieści się często w przedziale 1,8—2,6. Wymusiło to konieczność skonstruowania refraktometrów umożliwiających pomiar odpowiednio wyższych wartości współczynnika załamania światła. Na drodze do wytworzenia takiego przyrządu stoją dwie zasadnicze przeszkody:

- uzyskanie odpowiednio przezroczystego materiału o wysokim współczynniku załamania światła i twardości, z którego można by wykonać półkulę lub pryzmat refraktometru,
- wytworzenie cieczy kontaktowej o odpowiednio wysokim współczynniku załamania światła, dostatecznej ciekości, przezroczystości, niskiej agresywności wobec badanych obiektów oraz względem części roboczej refraktometru.

Pierwsza przeszkoda została łatwo pokonana, początkowo dzięki zastosowaniu materiałów naturalnych, np. kryształów diamentu, potem także dzięki wykorzystaniu materiałów syntetycznych, np. syntetycznego rutylu, tytanianu strontu. Druga przeszkoda była nieco trudniejsza do pokonania. Bariere tę przełamano, stosując nagrzewanie substancji kontaktowej i uzyskując oczekiwane właściwości cieczy kontaktowej.

Jedną z pierwszych konstrukcji służących do oznaczania wysokich wartości współczynnika załamania światła był refraktometr, w którym zastosowano pryzmat wykonany z diamentu ($n = 2,4173$) i dodatkowe pryzmaty szklane przepuszczające promień padający i odbity. Takie refraktometry są wykonywa-

ne jednostkowo na specjalne zamówienie. Dodatkową zaletą zastosowania takiego materiału jest czystość i twardość diamentu umożliwiające osiągnięcie wysokiej jakości poleru pryzmatu. Materiał ten jest również odporny na chemiczne oddziaływanie stosowanej cieczy kontaktowej, którą jest w tego rodzaju refraktometrach roztwór fosforu i siarki w jodku metylenu ($n = 2,05$). Refraktometr taki pozwala zmierzyć współczynniki załamania światła o wartości 1,54—2,03.

Jeśli diament zastąpi się syntetycznym rutylem i zastosuje ciecz kontaktową o odpowiednio wysokiej wartości współczynnika załamania światła, to tak wyposażony refraktometr mógłby mierzyć współczynniki załamania światła o wartości sięgającej 2,6. Jednak taki refraktometr wymaga zastosowania specjalnej substancji kontaktowej, co niezwykle wysoko podnosi koszt przyrządu i jego eksploatacji. Pomimo tego w ostatnich latach pojawił się na rynku refraktometr gemmologiczny, którego element roboczy wykonano z fabulitu (tytanianu strontu). Umożliwia on pomiar współczynników załamania światła o wartości do 2,21, lecz wymaga zastosowania substancji kontaktowej w postaci ciała stałego (stop zawierający siarkę rodzimą) przekształcanego w czasie pomiaru w ciecz poprzez elektryczne nagrzewanie stolika roboczego refraktometru.

Duże znaczenie diagnostyczne ma także uważna obserwacja skraju obszaru zaciemnionego widocznego w wizjerze refraktometru. W miejscu tym tworzy się pasmo barw dyspersyjnych. Najbardziej wyraziste jest ono wówczas, gdy do oświetlenia refraktometru używa się światła białego. Taka obserwacja pozwala zorientować się i ocenić w przybliżeniu **wielkość dyspersji** badanego obiektu. Jej wyrazem jest szerokość pasma barw dyspersyjnych (tzw. warstewka). Gdy widoczna jest wąska warstewka, wówczas badany obiekt ma dużą dyspersję, a jej wartość jest zbliżona do dyspersji materiału, z którego wykonano półkulę refraktometru. Szeroka tęczowa warstewka wskazuje na małą dyspersję badanego obiektu.

Zmiana długości fali światła używanego do oświetlania refraktometru umożliwia uzyskanie **krzywych dyspersji** współczynników załamania światła i obliczenie na tej podstawie wielu parametrów optycznych. Są to takie parametry jak:

- dyspersja średnia, czyli $n_F - n_C$; gdzie: $\lambda_F = 486,1$ nm, $\lambda_C = 656,3$ nm,
- dyspersja względna (zdolność rozszczepiająca względna), czyli $(n_F - n_C)/(n_D - 1)$; gdzie: $\lambda_D = 589,3$ nm,
- dyspersja właściwa, czyli $(n_F - n_C)/d$; gdzie: d — masa właściwa,
- dyspersja uogólniona, czyli $n_G - n_B$; gdzie: $\lambda_G = 431$ nm, $\lambda_B = 687$ nm,
- współczynnik dyspersji (liczba Abbego), czyli $v = (n_D - 1)/(n_F - n_C)$; jest to odwrotność dyspersji względnej.

Znajomość tych parametrów może służyć do pewniejszej identyfikacji monokryształów o bardzo zbliżonych wartościach współczynników załamania światła.

Znając wartość współczynników załamania, można obliczyć także: **refrakcję właściwą**, czyli:

$$R = [(n^2 - 1)]/[d(n^2 + 2)],$$

gdzie d oznacza masę właściwą kamienia (parametr ten podaje się zwykle dla linii D widma światła sodowego);

dwójłomność, czyli:

$$\Delta = n_e - n_o, \text{ dla kryształów jednoosiowych optycznie,}$$

$$\Delta = n_y - n_x, \text{ dla kryształów dwuosiowych optycznie}$$

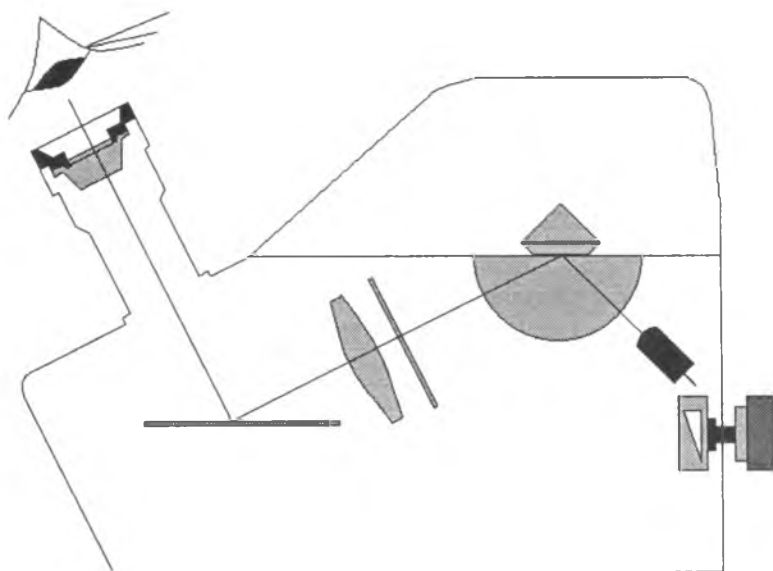
(jest ona miarą anizotropii optycznej takich kryształów, parametr ten jest podawany w charakterystykach optycznych minerałów w postaci największej możliwej wartości dla danego kryształu);

dyspersję dwójłomności, czyli $\Delta_F - \Delta_C$,

gdzie: $\lambda_F = 486,1 \text{ nm}$, $\lambda_C = 656,3 \text{ nm}$.

Refraktometrów używa się bardzo chętnie z uwagi na:

- dokładność uzyskiwanych wyników pomiaru współczynników załamania światła (bezwzględny błąd pomiaru nie przekracza 0,001—0,002),
- powtarzalność otrzymywanych wyników,
- łatwość wykonywania pomiaru także w obiektach oprawionych,
- szybkość wykonania pomiaru,
- duże możliwości interpretacji optycznej uzyskiwanych wyników,
- niewielki koszt pomiaru,
- poręczność używanego sprzętu pomiarowego, który może występować w wersji stacjonarnej lub kieszonkowej.

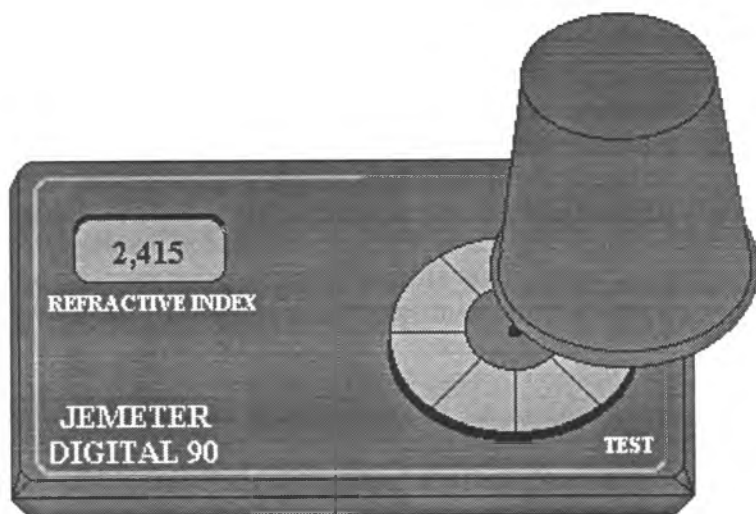


Do identyfikacji obiektów gemmologicznych najchętniej używa się obecnie refraktometrów kontaktowych (rys. 84) dających bezpośredni odczyt wartości współczynników załamania światła. Najbardziej rozpowszechnione refraktometry to: Duplex, Dialdex i Topcon. Przyrządy te, w porównaniu z przyrządami standardowymi nie przewidzianymi do badań obiektów gemmologicznych, mają szerszy zakres oznaczalności współczynnika załamania światła (najczęściej 1,30—1,80), są wyposażone w źródło światła monochromatycznego ($\lambda = 539,3 \text{ nm}$) oraz okular i filtr polaryzacyjny polepszające warunki odczytu wyników. Ruchome wieko chroni powierzchnię stolika roboczego przed zabrudzeniem i przypadkowymi uszkodzeniami. Powierzchnia robocza stolika refraktometru powinna być szczególnie chroniona, gdyż twardość wielu obiektów gemmologicznych jest o kilka stopni skali Mohsa większa od twardości szkła, z którego przeważnie wykonywana jest półkula lub pryzmat refraktometru (np. flint jenajski według skali Mohsa ma twardość 5).

3.4.2.2. Mikrorefleksometr

Jeszcze do niedawna dla precyzyjnego określenia wartości współczynnika załamania światła ($\pm 0,001$) posługiwano się głównie zjawiskiem całkowitego wewnętrznego odbicia światła, mierząc kąt graniczny. Ostatnio pojawiły się przyrządy działające według pomiaru zdolności refleksyjnej w świetle podczerwonym (o długości fali około 950,0 nm), dające wyniki takie, jak klasyczne refraktometry. Refleksometry mają wiele zalet, ale nie są pozbawione również wad ograniczających zakres ich stosowalności.

Jednym z najnowszych osiągnięć w tej dziedzinie jest mikrorefleksometr występujący pod handlową nazwą Jemeter (rys. 85). Uwzględnia on bardzo



Rys. 85. Mikrorefleksometr „Jemeter 90”

rozległy zakres wartości współczynników załamania światła obiektów gemmologicznych (w przedziale 1,450—2,999), przy czym gwarantowana dokładność pomiaru wynosi $\pm 0,003$. Badaniu tym instrumentem mogą być poddane obiekty mające przynajmniej jedną płaską, dobrze odpolerowaną fasetkę. Wielką zaletą przyrządu jest łatwość jego obsługi. Pomiar sprowadza się bowiem do umieszczenia obiektu na dysku pomiarowym, włączenia zasilania i dokonania odczytu na wyświetlaczu ciekłokrystalicznym. Przyrząd ten powinien jednak być testowany każdorazowo przed użyciem za pomocą obiektu o znanym i sprawdzonym inną metodą współczynniku załamania światła, np. brylantem. Istotną korzyścią jest również to, że w badaniu nie używa się cieczy kontaktowej, która mogłaby być agresywna wobec badanego obiektu lub o niebezpiecznych właściwościach w stosunku do wykonującego badanie, np. szkodliwa dla wzroku czy też silnie toksyczna.

Warto podkreślić, że w świetle podczerwonym mogą ulegać powiększeniu różnice między współczynnikami załamania światła materiałów, np. w świetle żółtym fabulit (tytanian strontu) ma 2,408, a diament 2,417, podczas gdy w świetle czerwonym fabulit ma 2,378, a diament 2,410. Do wytworzenia szerokiego pasma fal elektromagnetycznych w zakresie podczerwieni używa się diody elektroluminescencyjnej typu LED emitującej światło o długości fali 930,0—950,0 nm.

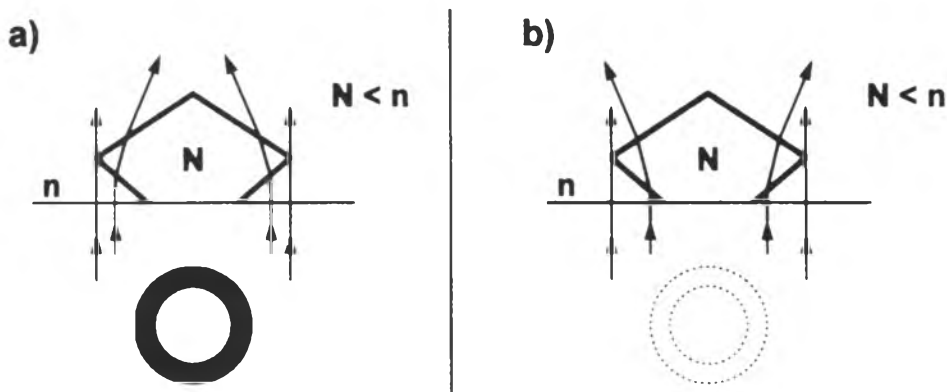
Mikrorefleksometry starszej konstrukcji są przeznaczone głównie do badań jakościowych polegających na odróżnianiu diamentu od jego imitacji lub badań większej grupy kamieni jubilerskich. Skonstruowane są w taki sposób, że uzyskiwane wskazanie identyfikuje określony kamień jubilerski lub jego imitację, np. diament, cyrkonię, fabulit (do grupy takich przyrządów należą np. Lustermeter, Diamond Eye), bądź w taki sposób, że możliwa jest jakościowa identyfikacja większej grupy kamieni jubilerskich (należą tu Gem Analyser, Jewellers Eye, Gemeter). Różnice między poszczególnymi modelami starszych mikrorefleksometrów w istocie nie są duże i dotyczą głównie stosowanych obwodów elektrycznych zapewniających stabilizację oświetlenia i warunków pomiaru. Z analizy zasad i systemu działania tych przyrządów wynika, że pomiary wykonane za pomocą refleksometru dają wartości przybliżone, gdyż nie jest możliwe uniknięcie błędów wynikających ze sposobu pomiaru wiązki odbitej, jakości poleru powierzchni odbijającej światło, jej czystości, istnienia absorpcji i podwójnego załamania światła w obiektach poddawanych pomiarom. Także budowa wewnętrzna obiektu (inkluzje, pęknięcia, zrosty itp.) może mieć znaczący wpływ na wskazania przyrządu i uzyskane wyniki. Dlatego też rezultaty pomiarów mikrorefleksometrem należy traktować z dużą ostrożnością, a pomiar powinien być powtórzony wielokrotnie na różnych fasetkach obiektu, po jednoczesnym upewnieniu się, że badany obiekt nie jest składany (np. dublet czy tryplet).

Do badań refleksometrycznych standardowym mikrorefleksometrem nie nadają się również obiekty gemmologiczne szlifowane w formie kaboszonu; 102 wyjątkiem mogą być kaboszony o płaskiej, polerowanej podstawie.

3.4.2.3. Ciecze imersyjne

Współczynnik załamania światła może być określony pośrednio przez obserwację konturu kryształu zanurzanego w cieczach o różnej gęstości optycznej, czyli o różnej wartości współczynnika załamania światła (cieczach imersyjnych). Jest on tym wyraźniejszy, im większa jest różnica współczynników załamania światła kryształu i otaczającej go cieczy. Jeśli między kryształem i jego otoczeniem nie występuje różnica współczynników załamania światła, to kontur kryształu przestaje być widoczny, ale tylko w świetle monochromatycznym. W świetle białym może być zauważalny efekt chromatyczny szczególnie dla kryształów o wysokiej dyspersji. Jeżeli współczynnik załamania światła cieczy imersyjnej jest mniejszy od współczynnika załamania światła badanego obiektu, to światło załamuje się na jego krawędziach w kierunku wnętrza obiektu i jego krawędzie wydają się ciemne (rys. 86a). W sytuacji odwrotnej, gdy współczynnik załamania światła cieczy imersyjnej jest większy od współczynnika załamania światła badanego obiektu, światło załamuje się na jego krawędziach w kierunku przeciwnym, na zewnątrz obiektu, i jego brzegi wydają się jasne (rys. 86b). Współczynnik załamania światła cieczy imersyjnej może być łatwo oznaczony refraktometrycznie. Do tego celu szczególnie użyteczny jest refraktometr Jelleya wyposażony w pryzmat na ciecz imersyjną o objętości około 2 mm^3 , umożliwiając wykonanie pomiaru współczynnika załamania światła cieczy w zakresie $1,116\text{—}2,353$ z dokładnością $\pm 0,001$. W roli cieczy imersyjnych wykorzystywany jest rozległy wachlarz substancji różniących się współczynnikiem załamania światła (tab. 12). Jako cieczy imersyjnych najchętniej używa się substancji nietoksycznych, inertych chemicznie, zmieniających wartość współczynnika załamania światła proporcjonalnie do stopnia rozcieńczenia.

Do binokularnej oceny współczynników załamania światła obiektów o nałożonym szlifie fasetkowym wykorzystuje się czasem tzw. smugę Beckego.



Rys. 86. Obiekt gemmologiczny w cieczy imersyjnej
a) ciemny kontur, b) jasny kontur

Wartości współczynnika załamania światła niektórych cieczy imersyjnych

Nazwa cieczy	Współczynnik załamania światła [20°C]	Temperatura wrzenia [°C]
Woda	1,333	100
Alkohol etylowy	1,362	78
Heksan	1,375	69
Alkohol propylowy	1,385	
Alkohol izoamylowy	1,407	130
Paraldehyd	1,420	128
Monochloro-octan etylu	1,421	143
Dwuchlorooctan etylu	1,439	155
Chloroform	1,446	61
Czterochlorek węgla	1,460	76
Olejek lawendowy	1,463	188
Olejek bergamotowy	1,465	
Nafta	1,45—1,47	
Gliceryna	1,473	290
Terpentyna	1,47	160
Olejek migdałowy	1,475	
Olej lniany	1,48	
Olej rycynowy	1,49	265
Toluen	1,497	111
Benzen	1,501	80
Olejek cedrowy	1,503	
Olejek anyżkowy	1,504	
O-ksylen	1,505	144

Nazwa cieczy	Współczynnik załamania światła [20°C]	Temperatura wrzenia [°C]
Olejek sandałowy	1,508	
Monochloro-benzen	1,525	132
Bromek etylenu	1,539	131
Olejek goździkowy	1,544	
Balsam kanadyjski	1,545	
Kreozol	1,546	
O-nitrotoluen	1,542	
Nitrobenzen	1,552	207
Bromobenzen	1,560	155
Benzoesan benzylu	1,569	324
O-toluidyna	1,573	200
Anilina	1,585	184
O-chloroanilina	1,589	209
Bromoform	1,598	149
Olejek cynamonowy	1,60	
Jodobenzen	1,620	186
M-bromoanilina	1,626	251
Chinolina	1,627	238
Czterobromoetan	1,628	112
Dwusiarczek węgla	1,63	46
Bromonaftalen	1,658	281
Jodonaftalen	1,702	305
Jodek metylenu	1,74	181

Powstaje ona w wyniku załamania i odbicia światła od powierzchni granicznej środowisk różniących się współczynnikiem załamania światła wskutek całkowitego wewnętrznego odbicia części światła padającego na tę granicę pod kątem większym od granicznego. Zachowanie się smugi Beckego podczas podnoszenia i opuszczania tubusa binokularu pozwala łatwo stwierdzić, które spośród stykających się ze sobą środowisk jest optycznie gęstsze. W metodzie tej obiekt badany zanurzany jest w naczyniu z cieczą imersyjną o znanym współczynnikiem załamania światła. Obiekt powinien spoczywać na tafli, czyli

głównej ścianie szlifu fasetkowego. Podczas badania obserwuje się wygląd krawędzi ścianek podstawy obiektu. Obniżając lub podnosząc tubus binokularu, łatwo jest zauważyć zmianę jasności krawędzi fasetek podstawy obiektu. Gdy obiekt jest zanurzony w cieczy imersyjnej o współczynniku załamania światła większym od własnego i gdy płaszczyzna ogniskowej binokularu znajduje się ponad obiektem, wówczas jego krawędzie są ciemne (rys. 87a). Gdy obniża się płaszczyznę ogniskowej binokularu w stronę obiektu, wówczas krawędzie fasetek podstawy ulegają rozjaśnieniu (rys. 87b). Gdy obiekt jest zanurzony

a) b)

Rys. 87. Binokularny obraz podstawy obiektu gemmologicznego z nałożonym szlifem fasetkowym. Współczynnik załamania światła cieczy imersyjnej jest większy od współczynnika załamania światła obiektu (wg Payette, 1994)

a) płaszczyzna ogniskowej znajduje się ponad obiektem, b) płaszczyzna ogniskowej opuszczona jest do wnętrza obiektu



w cieczy imersyjnej o współczynniku załamania światła mniejszym od własnego i gdy płaszczyzna ogniskowej binokularu znajduje się w cieczy imersyjnej ponad obiektem, wówczas jego krawędzie są jasne (rys. 88a). Gdy obniży się płaszczyznę ogniskowej binokularu w stronę obiektu, wówczas krawędzie fasetek podstawy ulegną ściemnianiu (rys. 88b).

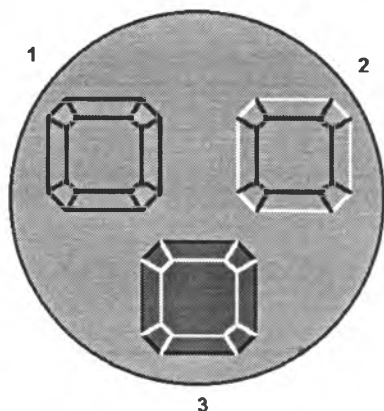
a) b)

Rys. 88. Binokularny obraz podstawy obiektu gemmologicznego z nałożonym szlifem fasetkowym. Współczynnik załamania światła cieczy imersyjnej jest mniejszy od współczynnika załamania światła obiektu (wg Payette, 1994)

a) płaszczyzna ogniskowej znajduje się ponad obiektem, b) płaszczyzna ogniskowej jest opuszczona do wnętrza obiektu



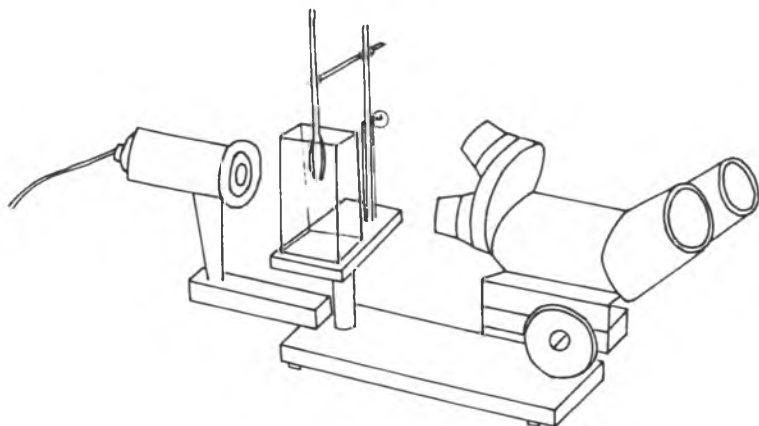
Wariantem tej metody jest obserwacja tzw. kontrastu w imersji zaproponowana przez B.W. Andersona (1971). Obiekt, który ma być badany tym sposobem, umieszcza się, taflą ku dołowi, w pojemniku z cieczą imersyjną o znanym współczynniku załamania światła. Pod pojemnik z cieczą imersyjną wsuwa się kartkę białego papieru. Podczas badania pojemnik z cieczą imersyjną i obiektem utrzymywany jest kilka milimetrów ponad ową kartką, a obiekt oświetla się dość silnym punktowym źródłem światła umieszczonym ponad pojemnikiem. Wyświetlony w taki sposób kontur obiektu ujawnia relacje współczynników załamania światła cieczy imersyjnej i zanurzonego w niej obiektu (rys. 89). Tak otrzymany obraz konturów obiektu gemmologicznego może być rejestrowany na błonie światłoczułej. Metodą tą bada się tylko obiekty przepuszczające światło. Może ona również służyć do szybkiej selekcji większej partii pozornie identycznych lub podobnych obiektów.



Rys. 89. Obrazy obiektów gemmologicznych w cieczy imersyjnej (tzw. kontrast w imersji) (wg P a y e t t e, 1994)
 1 — obiekt o współczynniku załamania światła podobnym do cieczy imersyjnej, 2 — obiekt o współczynniku załamania światła niższym od cieczy imersyjnej, 3 — obiekt o współczynniku załamania światła wyższym od cieczy imersyjnej

3.4.2.3.1. Imersjoskop

Przyrząd optyczny o tej nazwie jest w istocie binokulem gemmologicznym o układzie horyzontalnym, czyli o poziomej osi optycznej, wyposażonym w pojemnik na ciecz imersyjną (rys. 90). Ciecz imersyjna jest tak dobierana, by jej współczynnik załamania światła był podobny do współczynnika załamania światła badanego obiektu. Standardowo jest to jodek metylenu. Badany obiekt umieszcza się w pojemniku z cieczą imersyjną za pomocą specjalizowanego uchwyty zapewniającego możliwość dokonywania wszelkich manipulacji obiektem, np. rotacji wokół własnej osi. Przez umieszczenie obiektu w środowisku o podobnym współczynniku załamania światła redukuje się wszelkie zjawiska optyczne rozgrywające się na jego powierzchni podczas przenikania światła z cieczy imersyjnej do wnętrza obiektu. Polepsza to znacząco warunki obserwacji



Rys. 90. Imersjoskop

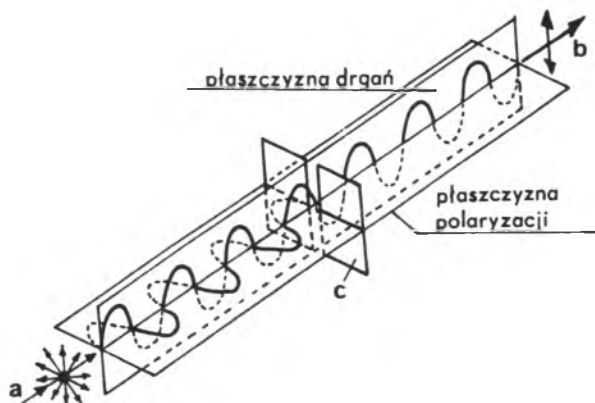
wnętrza obiektu badanego imersjoskopem. W konsekwencji obserwacja imersjoskopowa może ułatwić ujawnienie w obiekcie:

- linii wzrostu kryształu (zonalność),
- płaszczyzn sklejenia, np. dubletu, trypletu, multipletu,
- płaszczyzn wzrostu bliźniaczego,
- obecności inkluzji, ich charakteru i rozmieszczenia,
- oznak niektórych metod traktowania, np. obwódki dyfuzyjne, impregnacje barwne,
- różnic cech optycznych poszczególnych elementów dubletu, trypletu czy multipletu.

3.4.3. Polaryzacja światła

Światło naturalne jest nie spolaryzowane. Nieregularne, stałe zmiany kierunku drgań w wiązce światła nie spolaryzowanego wynikają z faktu, że światło jest emitowane przez poszczególne atomy. Ponieważ na obserwowane światło składają się porcje energii wysyłane przez różne atomy w różnym czasie, wypadkowy kierunek drgań także zmienia się w czasie. W rezultacie, w warunkach naturalnych, obserwujemy najczęściej światło nie spolaryzowane.

Polaryzacja światła polega na częściowym lub całkowitym uporządkowaniu drgań fali świetlnej (rys. 91). Jeśli drgania zachodzą w tej samej płaszczyźnie we wszystkich punktach wzdłuż promienia, to taka fala jest spolaryzowana liniowo. Jeśli zakreślają linię śrubową o przekroju eliptycznym, to fala jest spolaryzowana eliptycznie, a jeśli o przekroju kołowym, to kołowo. Światło spolaryzowane eliptycznie lub kołowo można otrzymać tylko ze światła spolaryzowanego liniowo.



Rys. 91. Polaryzacja światła (wg Łapota, 1995)

a — fala świetlna nie spolaryzowana, b — fala świetlna spolaryzowana liniowo, c — polaryzator 107

Polaryzację światła powodują:

a) odbicie i załamanie na granicy dwóch ośrodków różniących się współczynnikiem załamania światła, a zwłaszcza odbicie i załamanie od powierzchni dielektryka pod tzw. kątem Brewstera,

b) przejście przez ośrodek optycznie anizotropowy (podwójne załamanie światła i polaryzacja każdego z powstałych w ten sposób promieni, anizotropia absorpcji promieni powstałych w wyniku podwójnego załamania światła),

c) rozpraszanie światła na małych cząstkach; światło obserwowane pod kątem prostym do kierunku padania wiązki jest częściowo spolaryzowane, np. drobnodispersyjne suspensje, koloidy, zole.

W wiązce światła spolaryzowanego liniowo kierunek drgań świetlnych jest określony. Jest on prostopadły do promienia i leży w płaszczyźnie nazywanej płaszczyzną symetrii. Położenie płaszczyzny symetrii jest takie samo wzdłuż całej wiązki spolaryzowanej. Kierunek drgań jest w pełni zachowany. W świetle nie spolaryzowanym kierunek drgań poprzecznych nie jest stały wzdłuż promienia i ulega nieregularnym zmianom w czasie, można nawet powiedzieć, że światło takie jest spolaryzowane chwilowo, a położenie płaszczyzny polaryzacji ulega ciągłym nieregularnym zmianom. Kryształ anizotropowy, ze względu na swoją prawidłową budowę wewnętrzną, wyróżnia dla każdego kierunku biegnącego przez niego promienia tylko dwa możliwe prostopadłe wzajemnie kierunki drgań poprzecznych odpowiadające płaszczyznom polaryzacji dwóch rozchodzących się w kryształach promieni. Toteż drganie odbywające się w dowolnym kierunku zostaje przez kryształ rozłożone na dwa drgania składowe w kierunkach wyróżnionych przez kryształ.

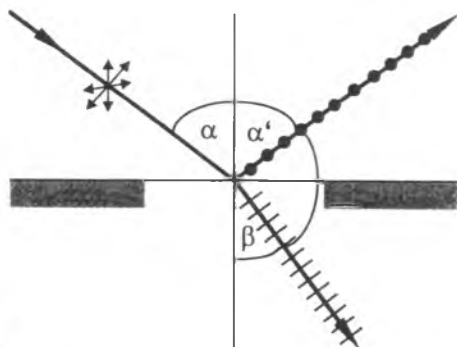
A. Polaryzacja światła przez odbicie i załamanie na granicy dwóch ośrodków. Światło naturalne, padając na granicę ośrodków przezroczystych pod takim kątem α , że jest spełniona zależność:

$$\operatorname{tg} \alpha = n,$$

gdzie:

α — kąt Brewstera,

n — współczynnik refrakcji,



Rys. 92. Polaryzacja światła przez odbicie i załamanie (kąt Brewstera) (wg Ł a p o t a, 1995)
 α — kąt padania, α' — kąt odbicia, β — kąt załamania

w wyniku odbicia ulega całkowitej polaryzacji liniowej. Promień odbity jest wówczas prostopadły do promienia załamanego, a drgania świetlne w tym promieniu zachodzą w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny padania (rys. 92). Wiązka odbita powstaje przez superpozycję promieniowań rozproszonych pochodzących od atomów drugiego środowiska. Zmienne pole elektryczne fali padającej przenikając do tego środowiska, indukuje w jego atomach lub drobinach drgające dipole, które promieniują drgając i te właśnie promieniowania składają się na falę odbitą.

Wzory pozwalające obliczyć natężenie i stopień polaryzacji światła odbitego od dielektryka pod dowolnym kątem oraz natężenie i stopień polaryzacji wiązki załamanej przenikającej w głąb dielektryka zawdzięczamy A. Fresnelowi:

$$R_{\perp} = \sin^2(\alpha - \beta) / \sin^2(\alpha + \beta),$$

$$R_{\parallel} = \operatorname{tg}^2(\alpha - \beta),$$

gdzie R jest stosunkiem natężenia promienia odbitego i padającego, gdy drgania wektora elektrycznego w świetle padającym zachodzą równolegle (\parallel) lub prostopadłe (\perp) do płaszczyzny padania wyznaczonej przez kąty padania, odbicia i załamania;

$$D_{\perp} = \sin^2\alpha \sin^2\beta / \sin^2(\alpha + \beta),$$

$$D_{\parallel} = \sin\alpha \sin\beta / \sin^2(\alpha + \beta) \cos^2(\alpha + \beta),$$

gdzie D to stosunek natężenia promienia załamane i padającego, gdy drgania wektora elektrycznego w świetle padającym zachodzą równolegle (\parallel) lub prostopadłe (\perp) do płaszczyzny padania wyznaczonej przez kąty padania, odbicia i załamania.

Przy prostopadłym padaniu światła ($\alpha = 0$) natężenia wiązek odbitych i przechodzących nie zależą od kierunku drgań względem płaszczyzny padania i wtedy

$$R = [n - 1/n + 1]^2,$$

$$D = 4n/(n + 1)^2,$$

gdzie:

n — współczynnik refrakcji.

B. Polaryzacja w związku z przechodzeniem przez ośrodki anizotropowe.

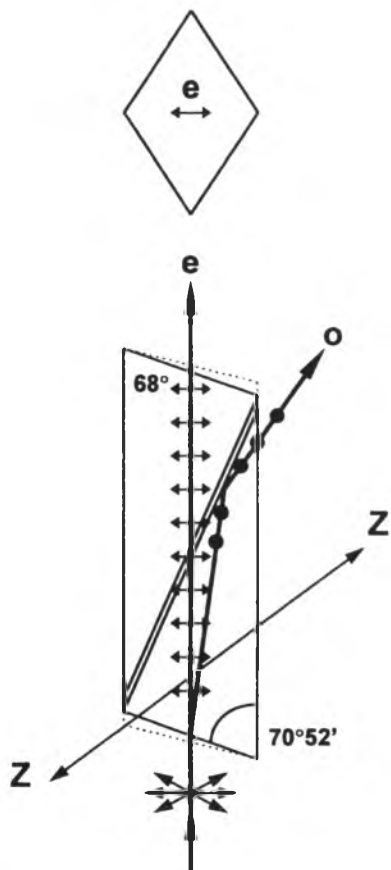
- Podwójnie załamujące światło. Prędkość światła w ośrodku anizotropowym zależy od kierunku jego rozchodzenia się oraz kierunku polaryzacji. Częstotliwości sieci krystalicznej stanowią w tych ciałach oscylatory anizotropowe o niejednakowej częstotliwości drgań własnych w różnych kierunkach. W kryształach jednoosiowych optycznie jeden z załamanych podwójnie promieni świetlnych, tzw. promień zwyczajny, jest spolaryzowany liniowo w płaszczyźnie prostopadłej do przekroju głównego kryształu, tj. płaszczyzny zawierającej oś optyczną kryształu. Drugi — tzw. promień nadzwyczajny, jest spolaryzowany w płaszczyźnie równoległej do przekroju głównego

kryształu. W kryształach dwuosiowych optycznie każdy z promieni załamanych jest spolaryzowany liniowo, a płaszczyzny polaryzacji są wzajemnie prostopadłe.

- Absorbujące kierunkowo światło. W takich ośrodkach załamujących podwójnie światło jedna ze składowych jest silniej pochłaniana, a światło przechodzące jest częściowo spolaryzowane liniowo. Stopień polaryzacji światła zależy od stopnia absorpcji promieni świetlnych drgających w określonym kierunku (np. turmalin). Współczynniki pochłaniania dla promienia zwyczajnego i nadzwyczajnego są wyraźnie różne. Pochłanianie to zależy często od barwy użytego światła (długości monochromatycznej fali elektromagnetycznej).

3.4.3.1. Polaryskop

Polaryzatorami nazywa się elementy optyczne wytwarzające światło spolaryzowane liniowo. Ten sam element optyczny może pełnić funkcję zarówno polaryzatora, jak i analizatora światła spolaryzowanego.



Rys. 93. Pryzmat Nicola (wg Łapota, 1995)
 o — promień zwyczajny, e — promień nadzwyczajny, Z — oś krystalograficzna Z równoległa do osi optycznej kryształu; płaszczyzna zawierająca oś Z i promień nadzwyczajny to przekrój główny kryształu

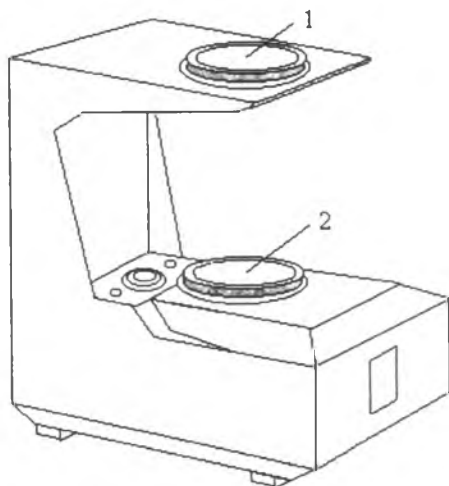
Jedną z najwcześniejszych konstrukcji służących wytwarzaniu światła spolaryzowanego liniowo był pryzmat W. Nicol'a (1768—1851) wykonany z odpowiednio oszlifowanego kryształu szpatu islandzkiego (kalcytu). Od nazwiska twórcy nazywany jest nikolem (rys. 93). Przez oszlifowanie romboedru kalcytu, którego naturalne ściany tworzą ze sobą kąty ostre $70^{\circ}52'$ i kąty rozwarte $109^{\circ}08'$, uzyskuje się nowe nachylenie ścian względem siebie w kątach ostrych 68° i kątach rozwartych 112° . Tak spreparowany romboedr kalcytu rozcina się na dwie części płaszczyzną prostopadłą do mniejszych ścian i płaszczyzny symetrii zawierającej oś optyczną. Obie części skleja się następnie balsamem kanadyjskim o współczynniku refrakcji $n = 1,545$, która to wartość jest mniejsza od współczynnika refrakcji promienia zwyczajnego kalcytu $n_o = 1,659$, a większa od współczynnika refrakcji promienia nadzwyczajnego kalcytu $n_e = 1,486$. Wiązkę światła nie spolaryzowanego rzutuje się równoległe do dłuższej krawędzi nikola. Powstały w wyniku podwójnego załamania światła i jednoczesnej polaryzacji promień zwyczajny pada na powierzchnię balsamu kanadyjskiego pod kątem większym od kąta granicznego i ulega całkowitemu wewnętrznemu odbiciu, by następnie ulec całkowitej absorpcji na wyczernionych ściankach bocznych pryzmatu. Promień nadzwyczajny przechodzi natomiast przez pryzmat bez zmiany kierunku. Drgania promienia nadzwyczajnego zachodzą w kierunku wyznaczonym przez położenie przekroju głównego kryształu kalcytu, czyli w przekroju zawierającym oś optyczną.

We współczesnych przyrządach polaryzacyjnych elementami optycznymi wytwarzającymi i analizującymi światło spolaryzowane są polaroidy (błony polaryzacyjne). Są to filtry polaryzacyjne umożliwiające otrzymywanie światła spolaryzowanego liniowo poprzez przepuszczenie promieni świetlnych drgających tylko w jednym, określonym azymucie i pochłonięcie, nieomal całkowite, promieni drgających w innych kierunkach. Polaroidy mają postać cienkich folii lub płaskich płytek wykonanych z tworzywa zawierającego wydłużone, równoległe i jednakowo optycznie zorientowane kryształki substancji wykazującej anizotropię absorpcji światła, np. herapatyt, alkohol poliwinylowy. Dużą zaletą polaroidów jest możliwość polaryzacji światła nie tylko w obszarze widzialnym, lecz także w bliskim nadfiolecie i bliskiej podczerwieni. Wadą polaroidów jest niepełna polaryzacja uzyskiwanego światła.

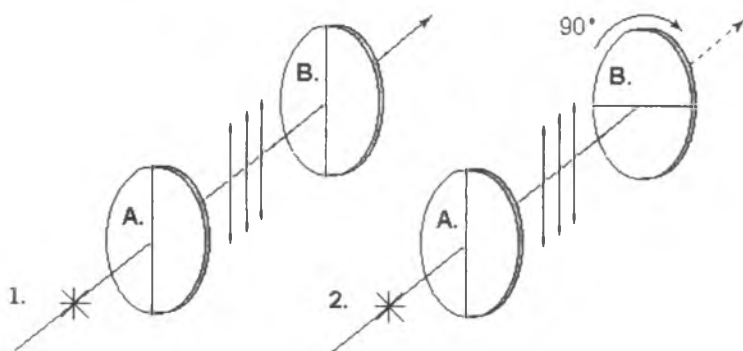
Układ polaroidów zestawionych ze sobą w ten sposób, że jeden znajduje się ponad drugim, nazywa się ortoskopem. Ortoskop stanowi zasadniczy składnik polaryskopu (rys. 94). Polaryskop jest bardzo prostym przyrządem przeznaczonym do wstępnej oceny niektórych cech optycznych obiektów gemologicznych.

Za pomocą polaryskopu można określić:

- przynależność do grupy optycznej,
- kierunek osi optycznej,
- pleochroizm,
- anomalie optyczne.



Rys. 94. Polaryskop (wg Liddicoata, 1981)
1 — polaryzator, 2 — analizator



Rys. 95. Bieg światła w ortoskopie (wg Reada, 1991)

1 — polaroidy ustawione równolegle płaszczyzną polaryzacji (maksymalne natężenie przechodzącego światła), 2 — polaroidy skrzyżowane (minimalne natężenie przechodzącego światła)
A, B — polaroidy

W polaryskopie, podobnie jak w mikroskopie polaryzacyjnym, polaroid wytwarzający światło spolaryzowane nazywany jest polaryzatorem, a polaroid badający światło spolaryzowane — analizatorem. Największe natężenie światła przechodzącego przez taki układ ma miejsce wówczas, gdy płaszczyzny polaryzacji obu elementów są do siebie równoległe (rys. 95). Gdy te płaszczyzny są wzajemnie prostopadłe (skrzyżowane), światło ulega całkowitemu wygaszeniu. Gdy płaszczyzny polaryzacji obu polaroidów tworzą ze sobą kąt α , wówczas natężenie wiązki przechodzącej będzie wynosiło:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha,$$

gdzie:

I_0 — natężenie wiązki przechodzącej przez polaroidy o wzajemnie równoległych płaszczyznach polaryzacji.

„Pole widzenia” polaryzatora wchodzącego w skład polaryskopu, czyli kąt między skrajnymi promieniami emitowanymi przez źródło światła, które mogą jeszcze przejść przez polaroid, wynosi w większości standardowych konstrukcji około 30° .

Podczas prowadzenia obserwacji polaryskopem filtry: polaryzujący i analizujący powinny być skrzyżowane. Kontroluje się to, patrząc poprzez oba filtry w kierunku źródła światła. Wzajemne położenie filtrów można skorygować obrotem analizatora lub polaryzatora.

Stolikiem polaryskopu jest obracana, obudowana metalowym pierścieniem, płaska płytka szklana znajdująca się ponad polaryzatorem. Na płycie umieszcza się pojemnik o przezroczystym dnie i wyczerzonych ściankach celem zredukowania refleksów pochodzących od badanego obiektu. Pojemnik ten przeznaczony jest na ciecz imersyjną, w której niekiedy zanurza się badany obiekt.

Polaryskopów używa się do badania obiektów przezroczystych i przeświecających. Badanie polaryskopem jest stosunkowo proste i jednocześnie bardzo szybkie.

Zależnie od zachowania się podczas badania polaryskopowego obiekty można podzielić na:

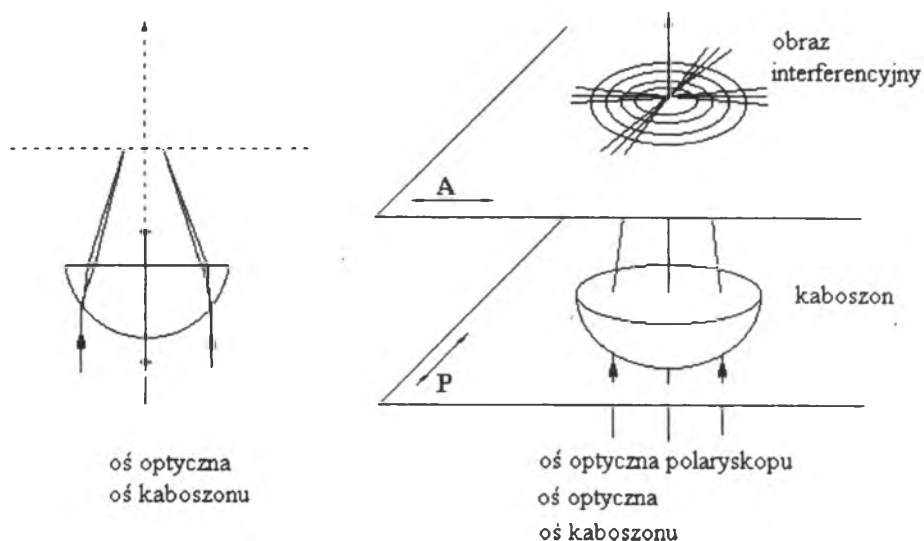
- Nie powodujące przepuszczenia światła przez analizator, który znajduje się w położeniu skrzyżowanym względem polaryzatora podczas wykonywania nimi rotacji na stoliku polaryskopu. Mogą to być kryształy izotropowe optycznie, np. spinel, granat, oraz kryształy anizotropowe optycznie, jednoosiowe, ustawione osią optyczną równoległą do osi optycznej polaryskopu, czyli do normalnej polaroidów, np. beryl (szmaragd) ma często oś optyczną ustawioną prostopadle względem tafli lub też jest to substancja amorficzna, np. szkło.
- Powodujące okresowe przepuszczanie światła przez analizator podczas wykonywania nimi rotacji na stoliku polaryskopu objawiające się czterokrotnym, co 90° , rozjaśnieniem i wygaszeniem światła; mogą to być kryształy anizotropowe, jednoosiowe lub dwuosiowe optycznie; dla takich obiektów można znaleźć takie ich położenie, w którym będą zachowywać się jak optycznie izotropowe, np. pozostając cały czas ciemne. W takiej sytuacji można stwierdzić, że oś optyczna badanego obiektu jest wyznaczona i jest równoległa do osi optycznej polaryskopu.
- Powodujące stałe przepuszczanie światła przez analizator podczas wykonywania nimi rotacji na stoliku; mogą to być substancje mikrokryształiczne, np. chalcedon lub kryształy izotropowe zawierające liczne drobne inkluzje; w podobny sposób zachowują się również kryształy w zasadzie izotropowe wykazujące anomalie optyczne wywołane napięciem wewnętrznym, deformacją struktury itp. (np. granat, spinel syntetyczny, diament).

Na zachowanie się obiektu podczas badania polaryskopowego może mieć wpływ także jego forma:

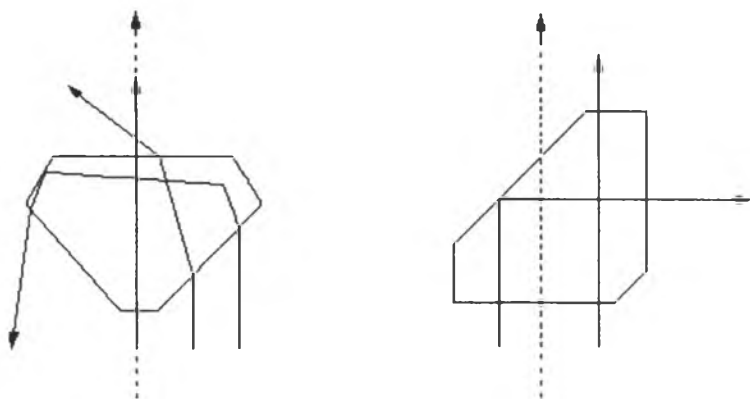
- kaboszonu; jeśli oś kaboszonu jest równoległa do osi optycznej kryształu, z którego został wykonany, to zachowuje się on jak lupa i przekształca wiązkę światła równoległego pochodzącego z polaryzatora w wiązkę światła

zbieżnego; w rezultacie na wyjściu z analizatora uzyskuje się obraz interferencyjny (rys. 96).

- szlifu fasetkowego; obiekty gemmologiczne są szlifowane w taki sposób, by wysyłały maksimum światła w stronę obserwatora; na ściankach obiektu zachodzą zjawiska załamania i odbicia, które mogą znacząco utrudnić wykonanie badania polaryskopowego (rys. 97); żeby wyeliminować lub znacząco ograniczyć te efekty, badany obiekt zanurza się w cieczy imersyjnej o bliskim mu współczynniku załamania światła.



Rys. 96. Kaboszon pod polaryskopem



Rys. 97. Wpływ szlifu fasetkowego i orientacji obiektu gemmologicznego na możliwość przenikania światła

Pleochroizm ocenia się za pomocą polaryskopu po usunięciu analizatora z biegu promieni świetlnych. Dokonuje się tego podczas obrotu stolikiem polaryskopu z umieszczonym nań obiektem. Jeśli po obrocie o co najmniej 90° obiekt zmienia barwę lub jej odcień, tzn. że jest on pleochroiczny. Podczas takiego badania zalecana jest obserwacja obiektu w różnych położeniach.

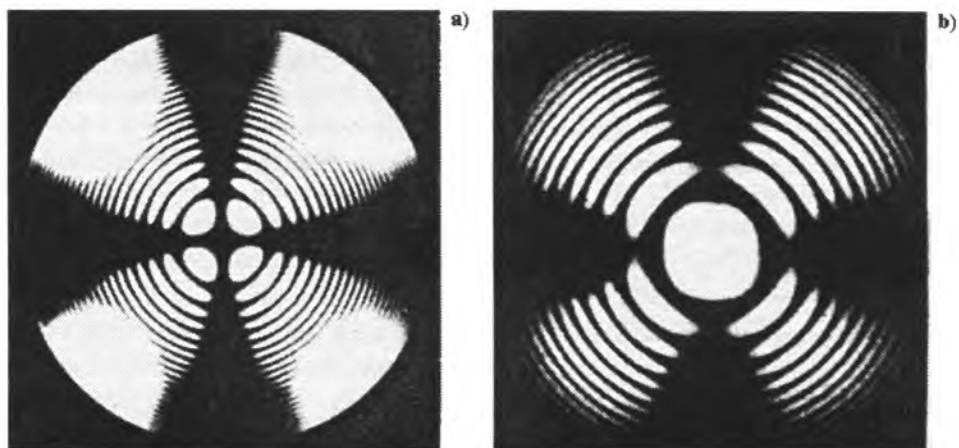
3.4.3.2. Konoskop

Obiekty izotropowe od obiektów jednoosiowych optycznie, ułożonych osią optyczną równoległe do osi optycznej polaryskopu, można odróżnić za pomocą polaryskopu. Dokonuje się tego przez zmianę ich położenia względem osi optycznej polaryskopu. Nie zawsze jest to jednak możliwe np. z powodu sposobu oprawy obiektu. W takich sytuacjach można się posłużyć konoskopem, czyli obserwacją z wykorzystaniem wiązki światła zbieżnego. Wytworzenie w polaryskopie takich warunków obserwacyjnych umożliwia zastosowanie soczewki skupiającej, która jest wprowadzana pomiędzy badany obiekt i analizator. W standardowo wyposażonym polaryskopie rolę soczewki skupiającej odgrywa czasem szklana sfera (tzw. sfera interferencyjna) wprowadzana w bieg strumienia światła spolaryzowanego za pomocą poręcznego uchwytu. Każda figura interferencyjna, zarówno kryształu jednoosiowego jak i dwuosiowego, optycznie składa się z:

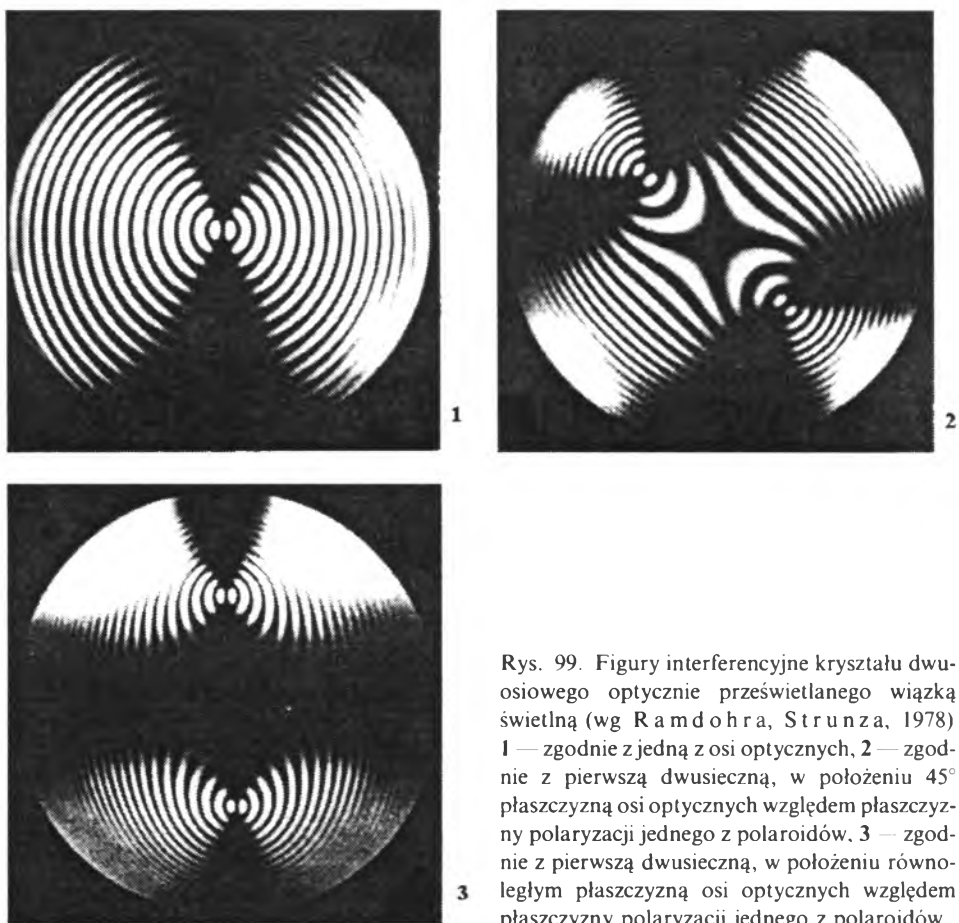
- koncentrycznych pierścieni barwnych (tzw. krzywych izochromatycznych) będących miejscem geometrycznym punktów odpowiadających promieniom przenikającym przez kryształ i wykazujących jednakową różnicę dróg,
- pasów wygaszeń (tzw. izogir) będących miejscem geometrycznym punktów odpowiadających promieniom mającym kierunki drgań zgodne z przekrojami głównymi skrzyżowanych polaroidów.

W przypadku obiektów jednoosiowych optycznie, ustawionych osią optyczną równoległe do osi optycznej polaryskopu, obraz interferencyjny składa się z krzyża wygaszeń (tzw. krzyża izogir) i koncentrycznie rozmieszczonych, barwnych pierścieni interferencyjnych (tzw. krzywych izochromatycznych), których w polu widzenia mieści się tym więcej, im wyższą dwójłomność wykazuje obserwowany konoskopowo obiekt (rys. 98).

Tym samym sposobem można się posłużyć dla odróżnienia kryształów jednoosiowych optycznie od kryształów dwuosiowych optycznie. Kryształy dwuosiowe optycznie dają odmiennie wyglądające figury interferencyjne, a ich wygląd zależy od położenia osi optycznych obiektu względem osi optycznej polaryskopu. Najbardziej charakterystyczne obrazy interferencyjne dają obiekty dwuosiowe ustawione jedną z osi optycznych lub dwusieczną kąta osi optycznych równoległe do osi optycznej polaryskopu (rys. 99). Znacznie mniej charakterystyczne są obrazy interferencyjne obiektów ustawionych płaszczyzną osi optycznych prostopadle względem osi optycznej polaryskopu, szczególnie gdy kąt osi optycznych takiego obiektu jest mały.



Rys. 98. Figura interferencyjna kryształu jednoosiowego optycznie prześwieczonego wiązką świetlną zgodnie z kierunkiem osi optycznej (wg Ramdohra, Strunza, 1978)
a) nieczynnego optycznie, *b)* czynnego optycznie



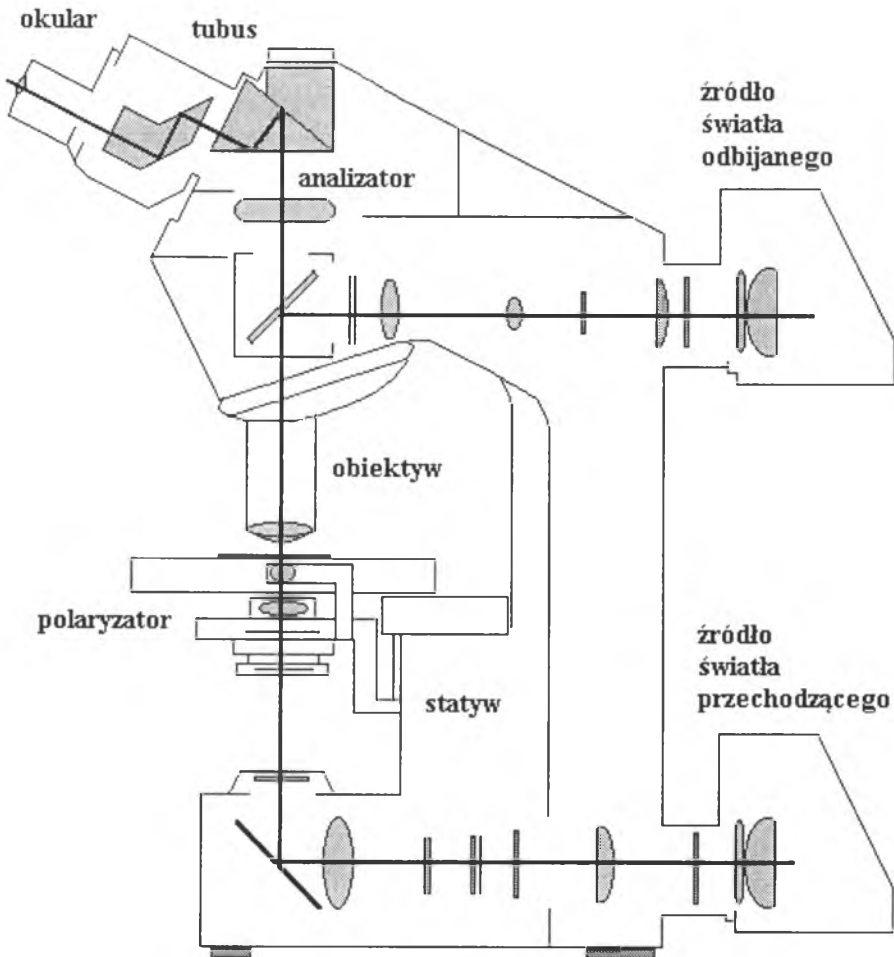
Rys. 99. Figury interferencyjne kryształu dwuosiowego optycznie prześwieczonego wiązką świetlną (wg Ramdohra, Strunza, 1978)
 1 — zgodnie z jedną z osi optycznych, 2 — zgodnie z pierwszą dwusieczną, w położeniu 45° płaszczyzn osi optycznych względem płaszczyzny polaryzacji jednego z polaroidów. 3 — zgodnie z pierwszą dwusieczną, w położeniu równoległym płaszczyzn osi optycznych względem płaszczyzny polaryzacji jednego z polaroidów

3.4.3.3. Mikroskop polaryzacyjny

Jest to przyrząd służący do szczegółowych obserwacji obiektów gemologicznych z wykorzystaniem silnego źródła światła spolaryzowanego z zastosowaniem dużych powiększeń (rys. 100). Maksymalne powiększenie użyteczne mikroskopu polaryzacyjnego nie przekracza zwykle 1500—2000 razy.

Mikroskop polaryzacyjny składa się z czterech zasadniczych układów:

- ① optycznego (obiektyw, okular, soczewki przeznaczone do badań specjalnych),
- ② polaryzującego i analizującego światło (tzw. ortoskop),



Rys. 100. Mikroskop polaryzacyjny uniwersalny

- ③ oświetlającego (źródło światła, kondensor),
- ④ mechanicznego (statyw, stolik, tubus, śruby regulacyjne).

Zasada działania mikroskopu polaryzacyjnego jest podobna do polaryskopu i polega na oświetleniu obiektu światłem spolaryzowanym. Promienie światła spolaryzowanego przechodzące przez poszczególne punkty badanego obiektu padają na obiektyw wytwarzający obraz rzeczywisty, odwrócony, silnie powiększony (maksymalnie około 100 razy). Światło to podlega reakcjom optycznym w analizatorze (o ile jest włączony w bieg promieni świetlnych), gdzie tworzą się w wyniku interferencji barwy interferencyjne lub następuje całkowite wygaszenie światła. Podczas rotacji obiektem o 360° czterokrotnie ma miejsce wygaszenie światła, powtarzające się co 90° . Obraz przetworzony optycznie w analizatorze jest następnie ponownie powiększany od kilku do kilkunastu razy przez okular działający jak lupa względem obrazu wytwarzanego przez obiektyw.

W standardowych badaniach gemmologicznych mikroskop polaryzacyjny wykorzystywany jest raczej wyjątkowo, głównie celem obserwacji bardzo drobnych inkluzji. Ich obserwacja zmierza zwykle do określenia formy krystalograficznej, pokroju, barwy, połysku, reliefu, kąta wygaszania światła i ma na celu dokonanie identyfikacji.

3.4.4. Barwa

W oku człowieka istnieją dwa układy receptorów świetlnych: pręciki i czopki.

Jeśli natężenie światła jest niskie, np. o zmroku, to oko nie odnosi wrażenia barwy. Przedmioty rozróżnia się wówczas na podstawie odcienia szarości. Jest to widzenie światłoczułe. Widzenie w mroku warunkują pręciki zawierające purpurę wzrokową (rodopsynę). Barwnik ten pochłania głównie promieniowanie zielononiebieskie. W słabym oświetleniu oko widzi zatem lepiej zielononiebieski odcinek widma świetlnego.

W warunkach wysokiego natężenia światła widzenie warunkują barwniki zawarte w czopkach. Każdy czopek zawiera jeden z trzech pigmentów podstawowych i jego maksimum absorpcji przypada w zakresie barwy czerwonej, niebieskiej lub zielonej. Postrzegany kolor jest wynikiem kombinacji odpowiedzi udzielonych przez każdy czopek na stymulację światłem.

Oko ludzkie reaguje na barwy różnie. Jest ono najczulsze na barwę zieloną (rys. 101). Szczyt jego czułości pokrywa się ze szczytem natężenia promieniowania słonecznego rejestrowanego na powierzchni Ziemi. Zjawisko to tłumaczy się adaptacją do życia w świetle słonecznym.

Oko jest tylko jednym z czynników warunkujących postrzeganie barw. Dwa pozostałe to:

- Źródło światła (tzw. typ oświetlenia), które może być żarowe, fluorescencyjne lub słoneczne (tzw. światło dzienne). W dość zgodnej opinii znawców

materiałów gemmologicznych najkorzystniejsze warunki obserwacji barwy stwarza światło dzienne tzw. nieba północnego. Jest to rozproszone światło słoneczne godzin południowych docierające do obserwatora od strony północnej części nieba (tzw. wzorcowe źródło światła C). Zmiana typu oświetlenia w skrajnych przypadkach skutkuje nawet zmianą barwy ocenianego obiektu (tzw. efekt aleksandrytu). Zjawisko to zauważono początkowo w specyficznej odmianie chryzoberylu — aleksandrycie. Później okazało się, że jest ono obecne w niektórych odmianach spinelu, granatu, korundu, fluorytu itp. Efekt aleksandrytu w chryzoberylu spowodowany jest obecnością jonów chromu w strukturze kryształu. Występujące w chryzoberylu jony chromu nie absorbują światła w odcinku niebieskozielonym i czerwonym widma widzialnego. Jeśli zatem w oświetleniu przeważa składowa zielona nad czerwoną, jest tak np. w świetle dziennym, to obiekt wydaje się zielony. Jeśli natomiast w oświetleniu przeważa składowa czerwona nad zieloną, np. w świetle żarowym, to obiekt wydaje się czerwony. Dlatego też nie jest obojętne, w jakich warunkach dokonuje się oceny barw. Podczas organoleptycznego badania barwy należy unikać zbyt jasnych i kontrastowych barw otoczenia. Dotyczy to zarówno ścian, jak i przedmiotów znajdujących się w pomieszczeniu, w którym dokonuje się oceny barwy. Znaczący wpływ może mieć także barwa ubioru osoby wykonującej badanie. Warto przy tym zauważyć, że wpływ barwy otoczenia na odcienie barwy obiektu gemmologicznego może być zarówno niekorzystny (obniżający walory estetyczne), jak i korzystny (podnoszący walory estetyczne). Z tego względu niektórym materiałom i obiektom gemmologicznym przydaje się barwne podkładki lub dobiera się kolorystykę oprawy, tła itp., by wpłynąć korzystnie na estetyczny efekt barwy. Należy to również uwzględniać w wystawiennictwie — witryny sklepów, ekspozycje giełdowe, muzealne. W celu ograniczenia wpływu wywieranego przez otoczenie na organoleptyczną ocenę barwy dąży się do tego, by była ona wykonywana w porównywalnych, powtarzalnych warunkach.

- Własności materiału gemmologicznego. Dla formowania się barwy największe znaczenie ma absorpcja. Współczesne badania pozwoliły określić kilka podstawowych przyczyn absorpcji światła przez materiały gemmologiczne. Jest to występowanie w strukturze krystalicznej materiału: chromoforów, centrów barwnych, aktywnych pasm energetycznych, przemieszczenie ładunków elektrycznych. W pewnych materiałach gemmologicznych barwa bywa rezultatem innych niż absorpcja zjawisk optycznych, np. rozpraszania, ugięcia, interferencji.

Barwne materiały gemmologiczne określa się mianem:

- idiochromatycznych, gdy barwę zawdzięczają konstytucyjnym składnikom materiału,
- allochromatycznych, gdy barwę zawdzięczają domieszkom (tab. 13).

Idiochromatyczne i allochromatyczne materiały gemmologiczne

Chromofor	Materiał allochromatyczny	Materiał idiochromatyczny
Tytan	korund (szafir niebieski)	
Wanad	zoizyt niebieski, beryl zielony, korund (szafir niebieskofioletowy)	
Chrom	korund (rubin), beryl (szmaragd), chryzoberyl (aleksandryt), spinel czerwony, granat (pirop, grossular), topaz różowy, jadeit	granat (uwarowit)
Mangan	beryl (morganit), kwarc różowy, andaluzyt, spodumen, turmalin różowy	rodochrozyt, rodonit, granat (spessartyn)
Żelazo	korund (szafir), beryl (akwamaryn), kwarc (cytryn), turmalin niebieski i zielony, jadeit	lazulit, oliwin, granat (almandyn)
Kobalt	syntetyczny spinel niebieski, syntetyczny kwarc niebieski	
Nikiel	syntetyczny korund żółty i zielony (syntetyczny szafir żółty i zielony), chryzopraz	
Miedź	syntetyczny korund zielony (syntetyczny szafir zielony)	malachit, turkus, diopfaz, azuryt

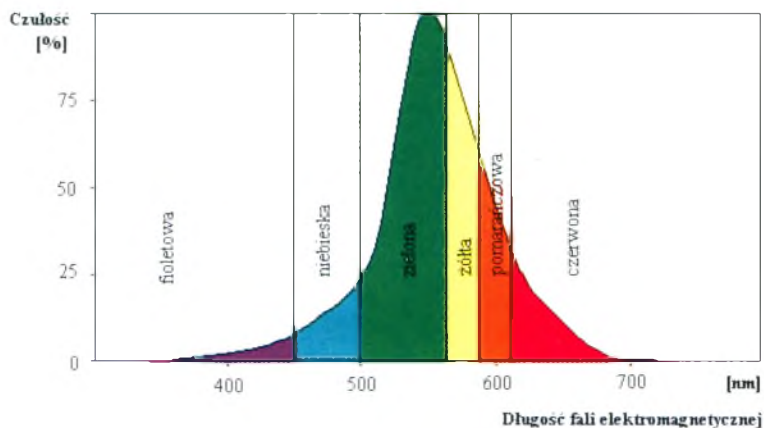
3.4.4.1. Barwy absorpcyjne

Absorpcję światła w materiale gemmologicznym może powodować:

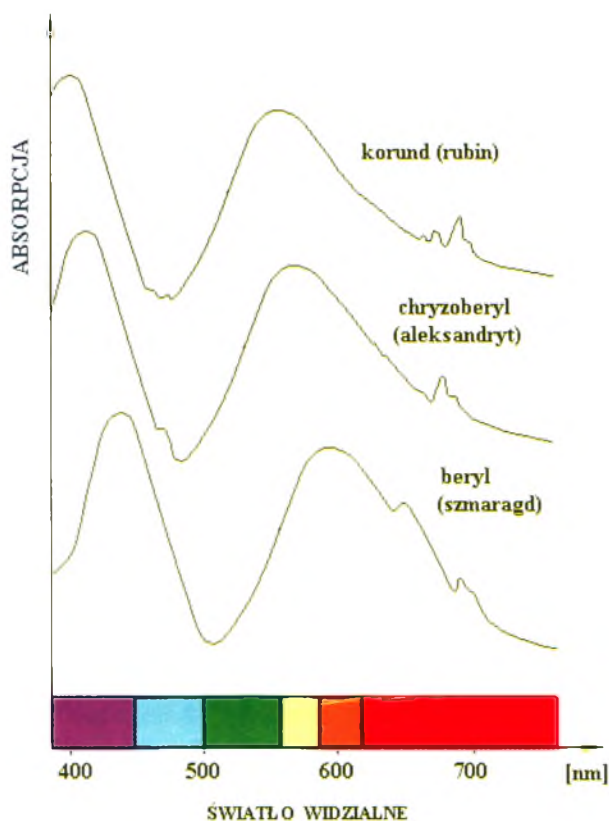
- obecność wtrąceń jonów metali, czyli tzw. chromoforów. W tej roli występują najczęściej jony: tytanu (Ti), wanadu (V), chromu (Cr), manganu (Mn), żelaza (Fe), kobaltu (Co), niklu (Ni), miedzi (Cu), rzadziej ceru (Ce), uranu (U), itp.,
- występowanie tzw. centrów barwnych, czyli defektów sieciowych w kryształach; do najlepiej poznanych należą luki po jonie ujemnym (tzw. centrum barwne *F*), luki utworzone przez trzy przylegające do siebie centra *F* (tzw. centrum barwne *R*), luki po jonie dodatnim (tzw. centrum barwne *V*),
- przemieszczenie ładunków elektrycznych, związane z przekazywaniem elektronów z jednych atomów kryształu do innych atomów tego kryształu,
- istnienie w kryształach aktywnych pasm energetycznych, których funkcjonowanie objaśnia teoria pasmowa ciała stałego.

Chromofory. Barwa jest wywoływana selektywną absorpcją promieniowania świetlnego przez niektóre jony występujące jako wtrącenia w strukturze kryształu (tab. 14). W jonach tych wskutek absorpcji promieniowania świetl-

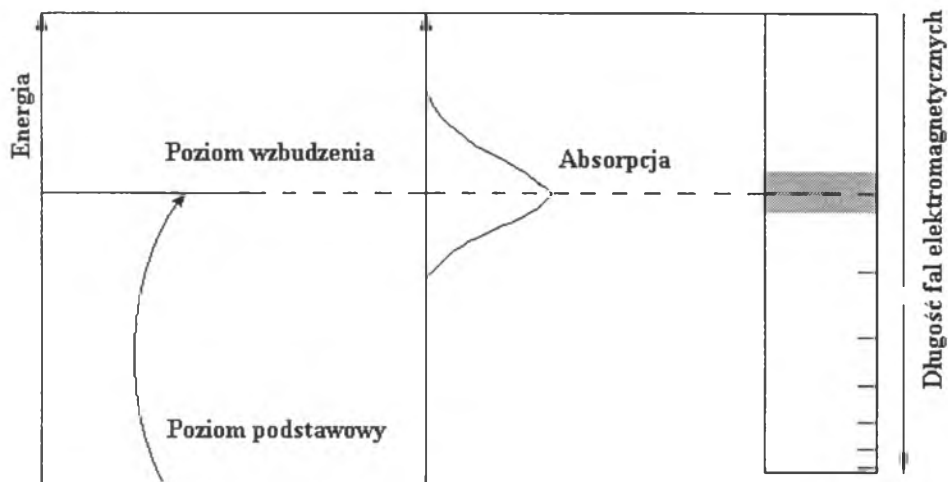
120 nego następuje przemieszczenie elektronu z jednego poziomu energetycznego



Rys. 101. Czułość ludzkiego oka na różne barwy (wg Fritscha, Rossmanna, 1990—1991)



Rys. 104. Subtelne różnice widma absorpcji światła widzialnego korundu (rubin birmański), chryzoberylu (aleksandryt tanzański) i berylu (szmaragdu kolumbijskiego) zawierających chromofor (Cr^{3+}) o takim samym planie koordynacji w strukturze kryształu (wg Fritscha, Rossmanna, 1990—1991)

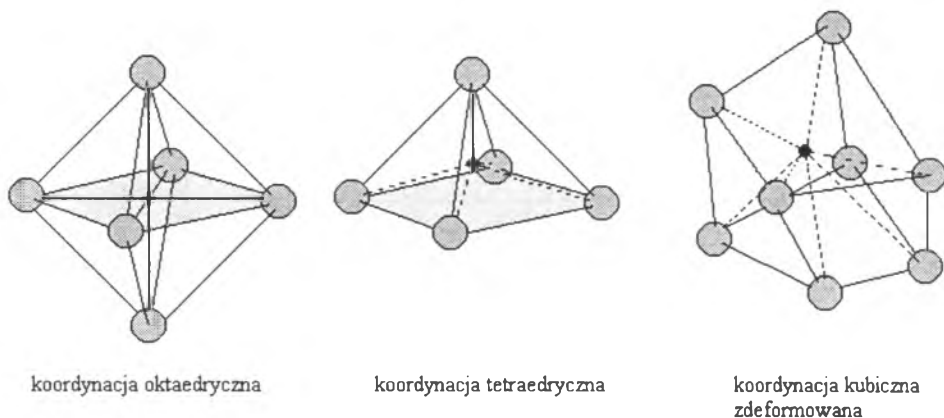


Rys. 102. Stan energetyczny chromoforu po absorpcji promieniowania elektromagnetycznego (wg Fritscha, Rossmana, 1990—1991)

na inny o wyższej energii (rys. 102). Jony wykazujące zdolność absorpcji promieniowania świetlnego nazywa się chromoforami. W większości przypadków różne chromofory są odpowiedzialne za różne barwy w tym samym kryształ, np. Fe^{2+} w spinelu jest powodem barwy niebieskiej, podczas gdy Cr^{3+} wywołuje barwę czerwoną. Barwa spowodowana występowaniem chromoforów w strukturze kryształu często jest wypadkową obecności różnych chromoforów.

Na barwę wywołaną obecnością chromoforów może mieć wpływ również kilka innych czynników, a szczególnie:

- Wartościowość chromoforu, np. beryl lub turmalin zawierający Mn^{2+} jest delikatnie różowy, podczas gdy beryl zawierający Mn^{3+} jest intensywnie czerwony.
- Natura atomów sąsiadujących z chromoforem, np. Co^{2+} w zielonym sfalerycie jest otoczony atomami siarki, a Co^{2+} w niebieskim spinelu jest otoczony atomami tlenu; w obu kryształach dwuwartościowy kation kobaltu spełnia funkcję chromoforu.
- Koordynacja chromoforu w strukturze krystalicznej. Najczęściej spotykana jest koordynacja oktaedryczna, rzadziej tetraedryczna, a sporadycznie kubiczna zdeformowana (rys. 103). Zależnie od sposobu koordynacji chromoforu możliwe jest występowanie różnych barw, np. Fe^{2+} w oliwinie występuje w nieco zdeformowanej koordynacji oktaedrycznej, dając barwę zieloną, a takie samo żelazo występujące w almandynie w zdeformowanej koordynacji kubicznej daje barwę intensywnie czerwoną. Ten sam chromofor o określonej wartościowości może wytwarzać różne barwy w różnych materiałach, mimo że jest otoczony taką samą liczbą takich samych jonów występujących w takiej samej koordynacji. Przykładem takiej sytuacji może



Rys. 103. Najczęściej spotykana koordynacja chromoforów w strukturze krystalicznej (wg Fritscha, Rossmana, 1990—1991)

być jon Cr^{3+} , który występuje w korundzie (rubin), chryzoberylu (aleksandryt) i berylu (szmaragd) w koordynacji oktaedrycznej. Ich widma absorpcji wykazują niewielką zmianę położenia pasm absorpcji (rys. 104). Jest to jednak wystarczające dla dokonania się znaczącej zmiany postrzeganej barwy, i tak: czerwoną barwę korundu (rubinu) tłumaczy większa czułość oka ludzkiego na barwę czerwoną niż niebieską, mimo że obie barwy odpowiadają zakresom transmisji światła widzialnego przez kryształ korundu (rubinu); zieloną barwę berylu (szmaragdu) wyjaśnia ogólne przesunięcie się pasm transmisji światła w stronę długofalowego odcinka widma świetlnego (por. rys. 104) i większa czułość oka na barwę zieloną niż czerwoną; podczas gdy aleksandryt, który jest wśród tych trzech minerałów ogniwem o pośrednich właściwościach, przepuszcza fale elektromagnetyczne w odcinkach: niebieskozielonym i czerwonym (patrz rys. 104). Toteż w świetle dziennym wydaje się zielony, gdyż światło słoneczne wykazuje w tym zakresie maksimum natężenia, a oko ludzkie jest jednocześnie najczulsze na ten zakres widmowy fal elektromagnetycznych, podczas gdy w świetle sztucznym, np. żarowym, wydaje się czerwony, gdyż światło to w porównaniu ze światłem słonecznym zawiera relatywnie większą porcję promieniowania z czerwonego odcinka widma świetlnego. Powodem przemieszczenia się pasm absorpcji i transmisji w rubinie, szmaragdzie i aleksandrycie są subtelne zmiany w otoczeniu jonów chromu polegające np. na zmianie odległości pomiędzy jonami chromu i skoordynowanymi z nimi jonami tlenu lub na zmianie pewnych detali geometrii koordynacji. Wszystko to wpływa na pole elektrostatyczne jonów chromu i powoduje pewne przemieszczenie oraz modyfikację pasm absorpcji i transmisji światła (rys. 104).

- Współwystępowanie różnych chromoforów. Przez ich wzajemne oddziaływanie wyjaśnia się niektóre subtelne zmiany odcieni barwy, np. odcienie czerwonej barwy korundu (rubinu) tłumaczy się relacjami ilościowymi

i wzajemnym oddziaływaniem współwystępujących w strukturze kryształu jonów Cr^{3+} , Fe^{2+} , V^{3+} .

- Wzrost koncentracji chromoforów w kryształach powoduje niekiedy wzrost odległości do pozostałych z nimi w koordynacji jonów. W rezultacie następuje modyfikacja barwy, np. granat zmienia barwę z czerwonej na purpurową wraz ze wzrostem zawartości jonów Cr^{3+} .

Barwy powodowane przez chromofory, najczęściej występujące w strukturze materiałów gemmologicznych, zebrano w tab. 14.

Tabela 14

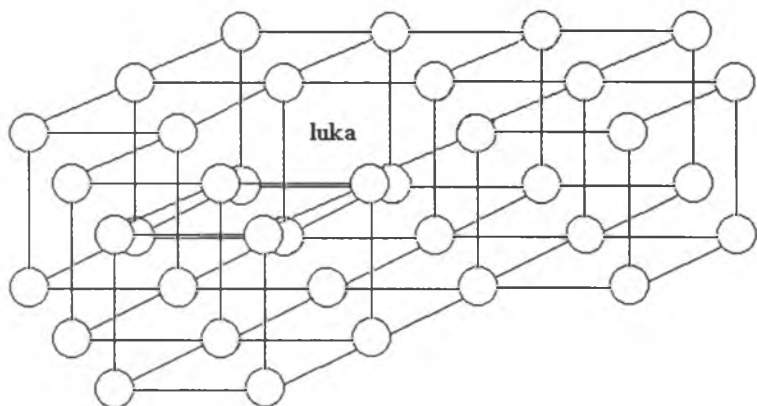
Barwy wywoływane przez chromofory w materiałach gemmologicznych

Chromofor i jego koordynacja	Barwa	Materiał gemmologiczny
Tytan (Ti^{3+}) oktaedryczna	różowa	kwarc różowy (pogląd nadal dyskutowany)
Wanad (V^{4+}) oktaedryczna	niebieska	zoizyt (tanzanit)
	zielona	apofyllit
Wanad (V^{3+}) oktaedryczna	niebieska	aksynit
	brunatnofioletowa	zoizyt
	zielona	beryl (szmaragd), grossular (tsaworyt), dysten, diopsyd, spodumen, kornerupin, turmalin (uwit)
	efekt aleksandrytu	korund, pirop, spessartyn
Chrom (Cr^{3+}) oktaedryczna	niebieska	kornerupin
	zielona	beryl (szmaragd), spinel, spodumen (hiddenit), diopsyd, jadeit, nefryt, euklaz, andradyt, oliwin, warrycyt, tytanit, zoizyt, uwarowit
	efekt aleksandrytu	chryzoberyl (aleksandryt), pirop
	czerwona do fioletowej	korund (rubin), spinel, pirop, taaffeit, topaz
Mangan (Mn^{3+}) oktaedryczna	czerwona do fioletowej, czerwona do różowej	beryl, piemontyt, turmalin (rubelit), sugilit, rodonit, zoizyt (thulit)
	zielona	andaluzyt
Mangan (Mn^{2+}) oktaedryczna	różowa	beryl (morganit), rodochrozyt, lepidolit, tytanit
	żółtozielona	turmalin (elbait)
Mangan (Mn^{2+}) kubiczna zdeformowana	pomarańczowa	spessartyn
Żelazo (Fe^{3+}) oktaedryczna	żółta	chryzoberyl
	żółtozielona	jadeit, epidot, andradyt

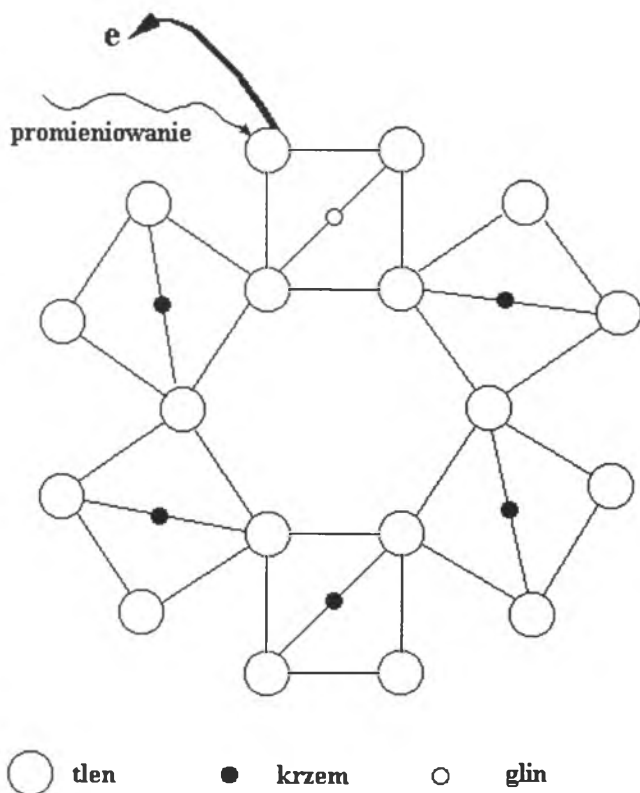
Chromofor i jego koordynacja	Barwa	Materiał gemmologiczny
Żelazo (Fe^{3+}) tetraedryczna	żółta	ortoklaz i inne skalenie, sylimanit
Żelazo (Fe^{2+}) oktaedryczna	niebieska	turmalin (elbait)
	zielonożółta	oliwin, diopsyd, aktynolit (nefryt), tektyt (mołdawit)
Żelazo (Fe^{2+}) tetraedryczna	niebieska	gahnit, ganospinel
Żelazo (Fe^{2+}) kubiczna zdeformowana	czerwona	pirop, almandyn
Kobalt (Co^{2+}) oktaedryczna	czerwona	kalcyt (kobaltokalcyt)
	zielona	sfaleryt
Kobalt (Co^{2+})	niebieska	spinel, staurolit
Nikiel (Ni^{2+}) oktaedryczna	zielona	wtrącenia nikłonośnego minerału ilastego w chryzoprazie, opalu
Miedź (Cu^{2+}) oktaedryczna	niebieska	turkus, chryzokola, azuryt
	zielona	malachit, diopfaz

Centra barwne. Absorpcję wywołują również defekty sieci krystalicznej, które często powstają w wyniku działania promieniowania wysokoenergetycznego. W warunkach naturalnych promieniowanie o takich właściwościach powstaje w związku z samorzutnym rozpadem pierwiastków promieniotwórczych, np. uranu, toru, radioaktywnych izotopów potasu. Defekty sieciowe mogą być wywołane także sztucznie między innymi przez naświetlanie materiału odpowiednio wysokoenergetycznym promieniowaniem.

Z fizycznego punktu widzenia defekty sieciowe traktuje się jak „pseudo-atomy”, gdyż zarówno ich wielkość, jak i zasięg oddziaływania są tej skali. Centrum barwne typu luki oznacza, że atom obecny zwykle w określonym miejscu sieci krystalicznej został z niego wyrwany mocą wysokoenergetycznego promieniowania (rys. 105). Jednak w większości przypadków zamiast przemieszczenia atomu w strukturze kryształu, następuje wyrwanie jedynie elektronu (rys. 106). Dodać należy, że aktywność defektu sieciowego warunkowana jest częstokroć obecnością w jego sąsiedztwie aktywnych jonów lub grup jonów (tab. 15). Centra barwne bywają niestabilne, ulegając destrukcji pod wpływem ciepła lub światła. Są one zatem równie łatwe do stworzenia, jak i do likwidacji. Przykładem może być korund, który pod wpływem niedużej dawki promieniowania rentgenowskiego staje się żółty, a wystawiony na działanie światła słonecznego lub lekko ogrzany szybko traci barwę. Powodem jest to, że



Rys. 105. Centrum barwne typu „luka” w diamencie (z sieci krystalicznej usunięty atom węgla) (wg Fritscha, Rossmana, 1990—1991)



Rys. 106. Centrum barwne powstałe przez wyrwanie elektronu z powłoki elektronowej atomu tlenu wchodzącego w skład struktury kwarcu dymnego (dodatkowym czynnikiem aktywizującym jest atom glinu, który zastępuje atom krzemu w tej strukturze) (wg Fritscha, Rossmana, 1990—1991)

Przykłady centrów barwnych w materiałach gemmologicznych

Materiał gemmologiczny	Barwa i jej geneza
Diament	zielona: luka po atomie węgla żółta: agregat trzech atomów azotu (tzw. centrum N3) pomarańczowa: luka w agregacie azotu (tzw. centrum H3 lub H4)
Kwarc	dymna: jony Al^{+3} i napromieniowanie żółta: jony Al^{3+} purpurowa: jony Fe^{3+} i napromieniowanie = Fe^{4+}
Korund	żółta: centrum barwne niestabilne o nieokreślonej strukturze
Topaz	niebieska: centrum barwne o nieokreślonej strukturze żółta: centrum barwne o nieokreślonej strukturze brunatna: centrum barwne o nieokreślonej strukturze
Turmalin	czerwona: jony Mn^{3+} i napromieniowanie
Skaleń	niebieska do zielonej: centra barwne wywołane jonami ołowiu
Beryl	niebieska: grupa CO_3^- lub NO_3 i napromieniowanie
Spodumen	zielona: Mn^{4+} i napromieniowanie żółta: centrum barwne o nieokreślonej strukturze
Fluoryt	niebieska: Y^{3+} i napromieniowanie różowa: grupa YO_2 żółta: jon tlenu zastępujący fluor
Sodalit	niebieska: jon O^- obok glinu i krzemu różowa: niestabilny elektron zastępujący jon Cl^-

dość słabymi siłami przez usytuowane w pobliżu kationy. Wystarczy lekkie ogrzanie lub naświetlenie, by spowodować ich powrót na poprzednie miejsca, co skutkuje odzyskaniem poprzedniej barwy przez kryształ.

Napromieniowanie może wywoływać równoczesne powstanie w kryształach różnych typów centrów barwnych. Przykładem może być niebieski topaz, uzyskujący podczas napromieniowania dwa typy centrów barwnych, z których jeden jest odpowiedzialny za tworzenie się barwy niebieskiej, a drugi — brunatnej. Lekkie ogrzanie takiego topazu pozwala łatwo pozbyć się centrów barwnych powodujących barwę brunatną. W rezultacie kryształ uzyskuje piękną barwę niebieską. Warto dodać, że wiele z tych procesów jest wykorzystywanych w opracowywaniu procedur traktowania materiałów gemmologicznych.

Przemieszczenie ładunków elektrycznych (transfer). Elektrony mogą przechodzić z atomu do atomu w różny sposób. Najczęściej jest to transfer ładunku elementarnego z jonu tlenu do najbliższego jonu metalu.

Najbardziej znanym przykładem barwy wywoływanej tego rodzaju mechanizmem jest fioletowa barwa kwarcu (ametystu), w którym następuje przekazanie ładunku z jonu tlenu do wtrąconego w strukturę kwarcu jonu żelaza, który jednocześnie uzyskuje niezwykłą dlań wartościowość ($O^{2-} \rightarrow Fe^{4+}$).

Czasem jest to bardziej odległe przemieszczenie się ładunku elementarnego. Przykładem mogą być dwa jony przedzielone atomem tlenu, które między sobą mogą niekiedy dokonywać również przekazania ładunków, np. w niebieskim korundzie (szafirze) ma miejsce transfer ładunków w myśl formuły (tab. 16):



Tabela 16

Mechanizmy przemieszczenia ładunku elektrycznego powodujące wytworzenie się barwy materiału gemmologicznego

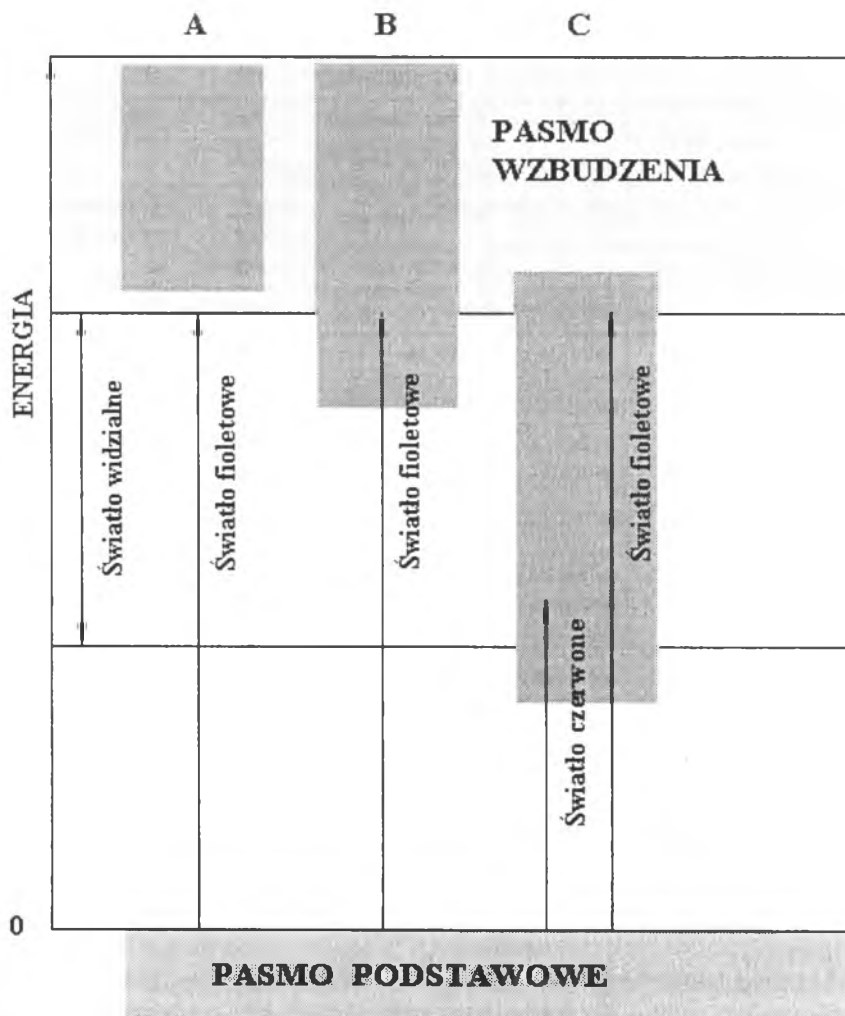
Proces	Barwa	Material
<i>Bliski transfer ładunku: tlen → jon metalu</i>		
$\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$	żółta do brunatnej	beryl (heliodor), korund, kwarc (cytryn), ametyst (wyprażony), sinhalit
$\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Fe}^{4+}$	purpurowa	kwarc (ametyst)
$\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Cr}^{6+}$	żółta do czerwonej	krokoit
<i>Odległy transfer ładunku: jon metalu → jon metalu</i>		
$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$	fioletowa niebieska	jadeit beryl (akwamaryn), kordieryt, lazulit, amfibol (glaukofan), dysten, euklaz
$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$	niebieska brunatna żółta do czarnej	korund, dysten turmalin (drawit), andaluzyt granat (andradyt, melanit)
$\text{Mn}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$	żółta do zielonawej	turmalin

Materiały pochodzenia organicznego, jak np. bursztyn, perły, koral uzyskują barwę na skutek przemieszczenia elektronów pomiędzy orbitalami molekularnymi.

Impulsem inicjującym transfer ładunków elementarnych jest pochłonięcie pewnej porcji energii dostarczanej przez światło. Barwa tworzy się przez absorpcję części fal elektromagnetycznych widma widzialnego.

Aktywne pasma energetyczne. W atomie izolowanym poziomy energetyczne zaznaczają się ostro. Z chwilą utworzenia sieci krystalicznej dochodzi do powstania pasm energetycznych, które są tworzone przez blisko siebie leżące poziomy energetyczne atomów. W tych pasmach występują elektrony przemieszczające się w obrębie sieci krystalicznej. Są one oddzielone od siebie przerwami energetycznymi (tzw. pasmami wzbronionymi). Wielkość tych przerw, czyli szerokość pasm wzbronionych, uwarunkowana jest strukturą kryształu i rodzajem budujących go atomów. Najwyższe zajęte pasmo dozwolone nazywa się

pasmem podstawowym albo walencyjnym. Sąsiadujące z nim pasmo nie wypełnione, do którego mogą przejść elektrony z pasma podstawowego, po uzyskaniu z zewnątrz niezbędnej porcji energii, nazywane jest pasmem wzbudzonego albo pasmem przewodnictwa. Energia potrzebna do przeniesienia elektronu z pasma podstawowego do pasma wzbudzonego jest charakterystyczną własnością każdego materiału krystalicznego.



Rys. 107. Barwa w świetle teorii pasmowej ciała stałego (wg Fritscha, Rossmana, 1990—1991)

A — energia potrzebna do przekroczenia strefy wzbronionej jest większa od energii dostarczonej przez światło, B — energia potrzebna do przekroczenia strefy wzbronionej jest mniejsza od energii dostarczonej przez światło fioletowe, C — energia potrzebna do przekroczenia strefy wzbronionej

W świetle teorii pasmowej barwa ciała stałego stanowi rezultat absorpcji energii fali elektromagnetycznej potrzebnej do przeniesienia elektronu z pasma podstawowego do wzbudzonego. Takie przejścia są możliwe tylko wówczas, gdy absorbowana energia jest wystarczająca do ich zrealizowania (rys. 107).

Gdy energia potrzebna do wykonania takiego przeskoku jest większa od energii dostarczanej przez światło widzialne, wtedy elektron nie może przekroczyć pasma wzbronionego. Fale elektromagnetyczne światła widzialnego przenikają wówczas przez kryształ bez absorpcji i przy braku chromoforów, centrów barwnych itp. pozostaje on bezbarwny (rys. 107A). Jednocześnie kryształ jest izolatorem elektrycznym. Tego rodzaju właściwości wykazują np.: diament, korund, beryl, kwarc, topaz oraz wiele innych tlenków i krzemianów.

Gdy energia potrzebna do przekroczenia pasma wzbronionego jest mniejsza od energii dostarczanej przez światło fioletowe, jest ono absorbowane częściowo. Zakres tej absorpcji i wynikająca z niej barwa stanowią charakterystyczną właściwość materiału. Powstałe w ten sposób barwy mieszczą się zasadniczo w przedziale od barwy żółtej do czerwonej widma widzialnego (rys. 107B).

Gdy energia potrzebna do przekroczenia pasma wzbronionego jest mniejsza od energii dostarczanej przez światło czerwone, światło jest absorbowane w całości. W konsekwencji taki kryształ będzie nieprzezroczysty, czarny. Jednocześnie będzie on dobrym przewodnikiem elektryczności (rys. 107C).

3.4.4.1.1. Widma optyczne (spektroskop)

Obraz uzyskiwany przez rozłożenie promieniowania optycznego na składowe różniące się długością fali nazywany jest widmem optycznym.

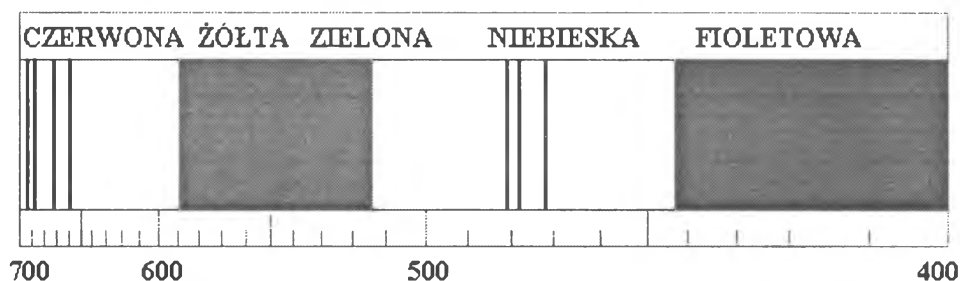
Wyróżnia się widma optyczne:

- **emisyjne** (mogą one być liniowe, pasmowe lub ciągłe),
- **absorpcyjne**.

Widmo optyczne emisyjne to obraz światła emitowanego przez określoną substancję, który w obszarze widzialnym ma postać bądź jasnych, barwnych prążków (widmo optyczne liniowe) lub pasm (widmo optyczne pasmowe) rozmieszczonych na ciemnym tle, bądź jest to zespół barw przechodzących sukcesywnie jedna w drugą od czerwieni do fioletu (widmo optyczne ciągłe). Widma optyczne liniowe dają pobudzone do świecenia jednoatomowe gazy i pary znajdujące się pod małym ciśnieniem. Poszczególne prążki widma liniowego mają przeważnie budowę złożoną (tzw. multiplety widmowe) i grupują się w serie widmowe. Są spowodowane przeskokami elektronów pomiędzy dozwolonymi poziomami energetycznymi atomu. Widmo optyczne liniowe jest charakterystyczne dla atomów pierwiastka emitującego promieniowanie, a własności widma są związane ze strukturą elektronową i występującymi oddziaływaniami. Widmo optyczne pasmowe składa się z wielu bardzo gęsto rozmieszczonych linii widmowych, które w przyrządach spektralnych o niskiej

rozdzielczości zlewają się w pasma ostro ograniczone od jednej strony, a rozmyte i nieostre z drugiej strony. Widmo pasmowe jest charakterystyczne dla cząsteczek chemicznych. Jego skomplikowany charakter wiąże się z budową cząsteczek, gdyż emisja promieniowania wynika nie tylko ze zmiany energii elektronów, lecz także ze zmiany energii ruchów oscylacyjnych atomu w cząsteczce oraz ruchów rotacyjnych cząsteczki jako całości. Widma optyczne ciągle dają pobudzone do świecenia ciała stałe i ciekłe oraz gazy znajdujące się pod dużym ciśnieniem, a także swobodne atomy i cząsteczki, gdy zachodzą procesy fotojonizacji, rekombinacji, fotodysocjacji i asocjacji. Widma optyczne ciągle powstają wówczas, gdy w wyniku poszerzenia spowodowanego oddziaływaniami wzajemnymi linie widmowe lub nawet całe pasma zachodzą na siebie.

Widmo optyczne absorpcyjne to obraz światła pochłanianego przez daną substancję, który w obszarze widzialnym ma postać ciemnych prążków lub pasm rozmieszczonych na tle ciągłego widma optycznego emisyjnego (rys. 108).



Rys. 108. Widmo absorpcyjne (prążki i pasma absorpcji -- czarne) (wg Payette, 1994)

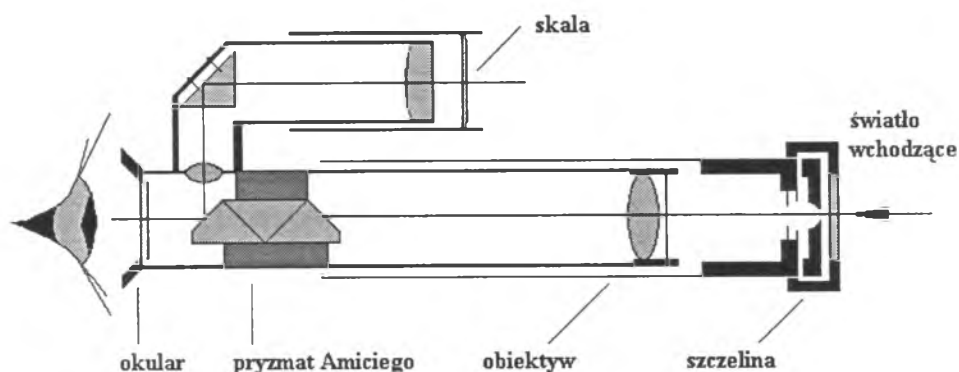
Widmo absorpcyjne powstaje w wyniku pochłaniania określonych długości fal elektromagnetycznych przez ciało, przez które przechodzi promieniowanie o widmie optycznym ciągłym. Pochłaniane są te same długości fal, które ciało to emitowałoby w widmie optycznym emisyjnym.

Oznaczenie długości fal światła widzialnego zaabsorbowanego przez obiekty gemmologiczne ma ważne znaczenie w badaniach gemmologicznych. Widmo absorpcyjne obiektów gemmologicznych przedstawia się jako seria prążków i pasm absorpcji rozmieszczonych wzdłuż tła widma światła białego. W widmie absorpcyjnym niektórych materiałów gemmologicznych obok prążków i pasm absorpcji obserwuje się także występowanie jasnych lub jaskrawych prążków, które powstają wówczas, gdy w obiekcie zawarte są pierwiastki przejściowe. Światło padające na obiekt gemmologiczny stymuluje je w ten sposób, że emitują światło o charakterystycznej dla siebie długości fali. Prążki tego rodzaju nazywane są prążkami fluorescencyjnymi. Przykładem tego rodzaju pierwiastka może być chrom zawarty w rubinie lub czerwonym spinelu. Daje on prążki

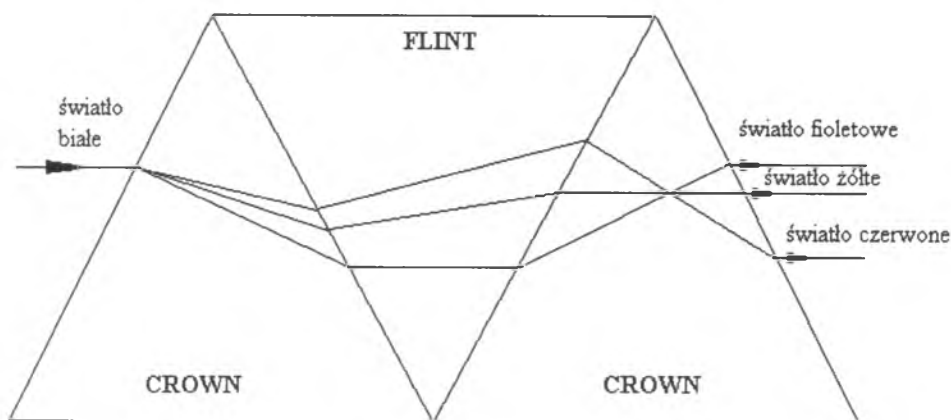
Otrzymywaniu i badaniu widm optycznych służą przyrządy spektralne. Jednym z podstawowych przyrządów spektralnych przeznaczonych do rozkładu i pomiaru widm optycznych jest spektroskop.

Spektroskop gemmologiczny to przyrząd przystosowany do rozkładu i pomiaru widm absorpcyjnych obiektów gemmologicznych. Bada się nim widma absorpcyjne metodą wizualną. W podstawowych badaniach gemmologicznych używa się spektroskopów:

- pryzmatyczny (rys. 109), zwanego także spektroskopem bezpośredniej obserwacji, którego głównymi elementami są: pryzmat Amiciego i lunetka obserwacyjna; pryzmat Amiciego jest skonstruowany w taki sposób, że promienie światła wychodzące z badanego obiektu doznają możliwie małego odchylenia od kierunku ich biegu (rys. 110); najczęściej są użytkowane jako spektroskopy przenośne (kieszonkowe),



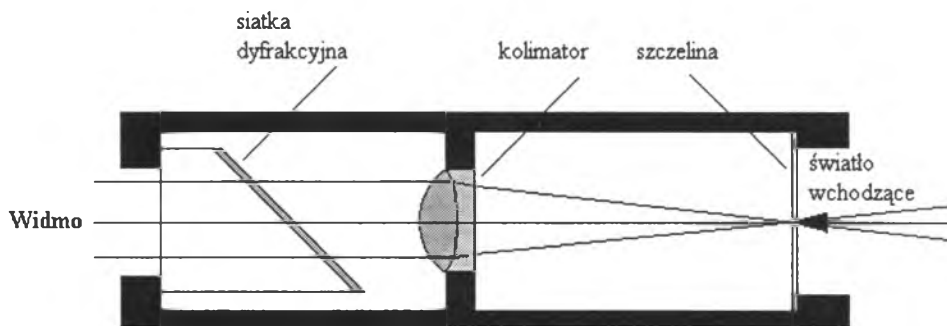
Rys. 109. Spektroskop pryzmatyczny (wg Reada, 1991)



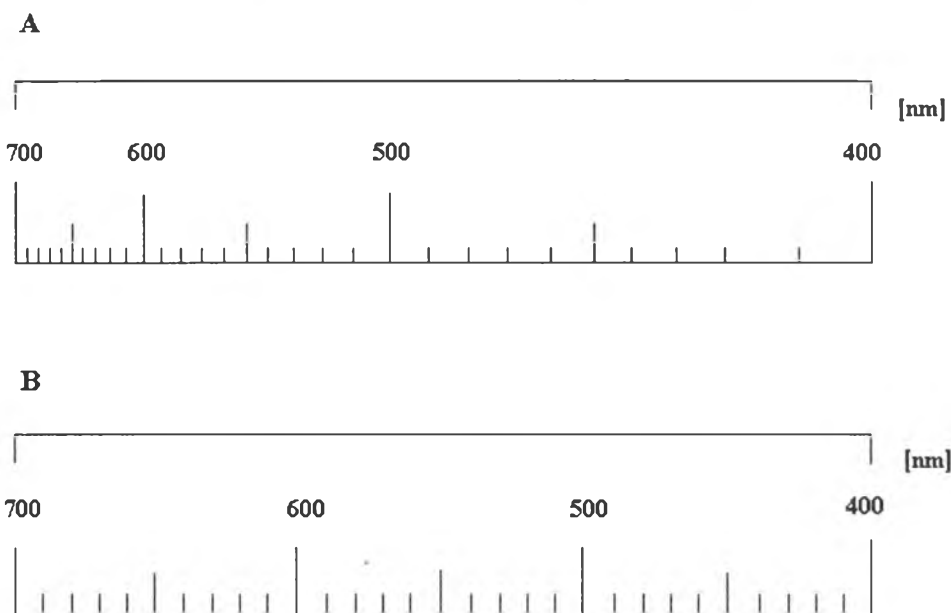
Rys. 110. Pryzmat Amiciego (wg Reada, 1991)

— siatkowego, którego głównymi elementami są: siatka dyfrakcyjna i lunetka obserwacyjna; użycie siatki dyfrakcyjnej zapewnia większą zdolność rozdzielczą przyrządu (rys. 111); dość wysoki koszt takich przyrządów sprawia, że są one stosunkowo rzadko użytkowane przez gemmologów.

W większości spektroskopów gemmologicznych stosuje się obserwacje i pomiar w zakresie 400—700 nm. W spektroskopie siatkowym używa się skali, której przedziały wycechowane w nanometrach lub angstrmach są tej samej długości dla poszczególnych zakresów widma światła białego (rys. 112). W spektroskopie pryzmatycznym używa się skali, której przedziały są różnej



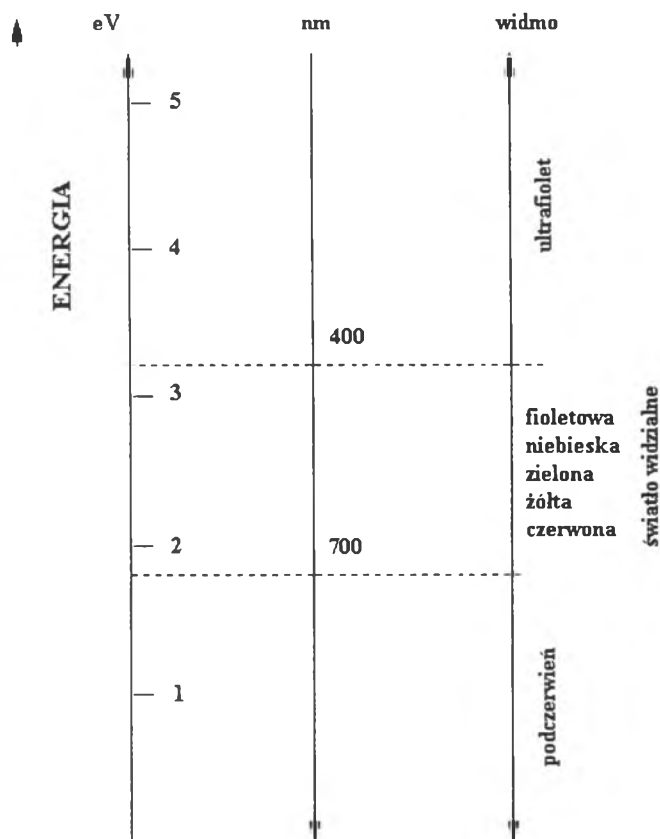
Rys. 111. Spektroskop siatkowy (wg R e a d a, 1991)



Rys. 112. Rozkład długości fal świetlnych na skali spektroskopu
A — pryzmatycznego, B — siatkowego (wg R e a d a, 1991)

długości dla poszczególnych zakresów widma światła białego; odcinki widma fal dłuższych są coraz to bardziej ściśnione, a odcinki fal krótszych — poszerzone. Utrudnia to niekiedy identyfikację poszczególnych prążków i pasm.

Badanie za pomocą spektroskopu gemmologicznego polega na silnym oświetleniu obiektu gemmologicznego i obserwacji widma światła przechodzącego przez obiekt lub odbitego od jego powierzchni. Spektroskopy gemmologiczne są przyrządami o relatywnie niewielkich zdolnościach rozdzielczych wykorzystującymi silne źródła światła. Dla zapobieżenia nagrzewaniu się obiektów, co może być dla nich potencjalnie groźne, np. przez spowodowanie pęknięć, w niektórych spektroskopach stosuje się specjalne filtry ciepłe lub oświetlacze światłowodowe. Spektroskopy bywają wyposażone w monochromatory (tzw. obrotowe filtry świetlne) umożliwiające wykonywanie obserwacji w wybranym zakresie widmowym, np. w świetle czerwonym lub zielonym czy też niebieskim. Przysłona irysowa pozwala kontrolować natężenie światła docierającego do badanego obiektu, a regulowany okular umożliwia uzyskanie bardzo wysokiej jakości obrazu widma zarówno w odniesieniu do rozdzielczości, jak i wy-

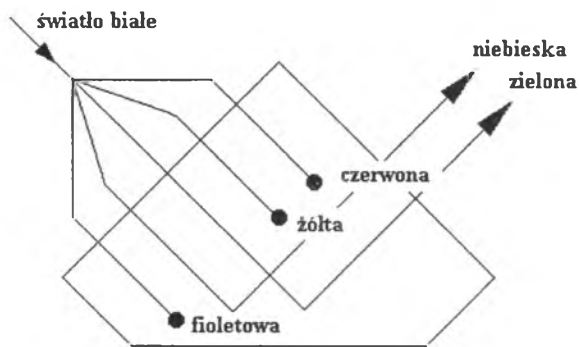


Rys. 113. Zależność między energią i długością fal elektromagnetycznych

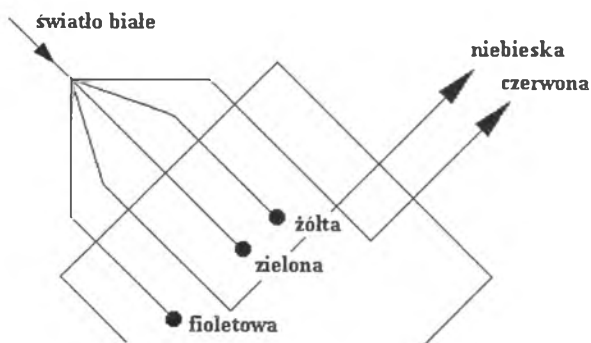
razistości tworzących go prążków i pasm. Niektóre spektroskopy gemmologiczne są wyposażone w obrotowy uchwyt pozwalający na dogodne zamocowanie i manipulację badanym obiektem. Jest to szczególnie użyteczne w badaniu obiektów wykazujących zmianę wyglądu widma optycznego zależnie od kierunku przenikania lub odbicia światła. Przydatnym wyposażeniem jest również filtr polaryzacyjny nakładany na okular spektroskopu.

Światło zawierające wszystkie długości fal w proporcjach takich jak w promieniowaniu słonecznym daje wrażenie światła białego. Największą energię ma promieniowanie krótkofalowe widma widzialnego (rys. 113). Barwa obiektu gemmologicznego oglądanego w świetle białym jest przeważnie wynikiem absorpcji pewnych długości fal wchodzących w skład widma widzialnego i tworzą ją te długości fal świetlnych, które nie zostały pochłonięte (rys. 114). Barwa takiego obiektu zatem jest dopełniająca względem barw zaabsorbowanych przez obiekt. Barwa dopełniająca nie jest monochromatyczna, czyli nie można jej przypisać określonej długości fali elektromagnetycznej (barwa prosta). Jest ona barwą złożoną składającą się z różnych długości fal elektromagnetycznych wchodzących w skład widma światła białego, z wyjątkiem odpowiadają-

A



B



Rys. 114. Barwa absorpcyjna szmaragdu (A) i rubinu (B) (wg Payette, 1994)

cych zaabsorbowanym częściom widma (tab. 17). Oko człowieka nie odróżnia barwy prostej od barwy złożonej. Wrażenie światła wywołuje wektor elektryczny fali świetlnej. Jeśli oko jest pobudzane równocześnie promieniowaniem o różnych długościach, to w mózgu powstaje wrażenie nowej barwy różnej od monochromatycznych barw składowych. Tylko przez zmieszanie promieni fioletowych i czerwonych powstaje wrażenie barwy purpurowej, której nie ma w widmie światła białego.

Tabela 17

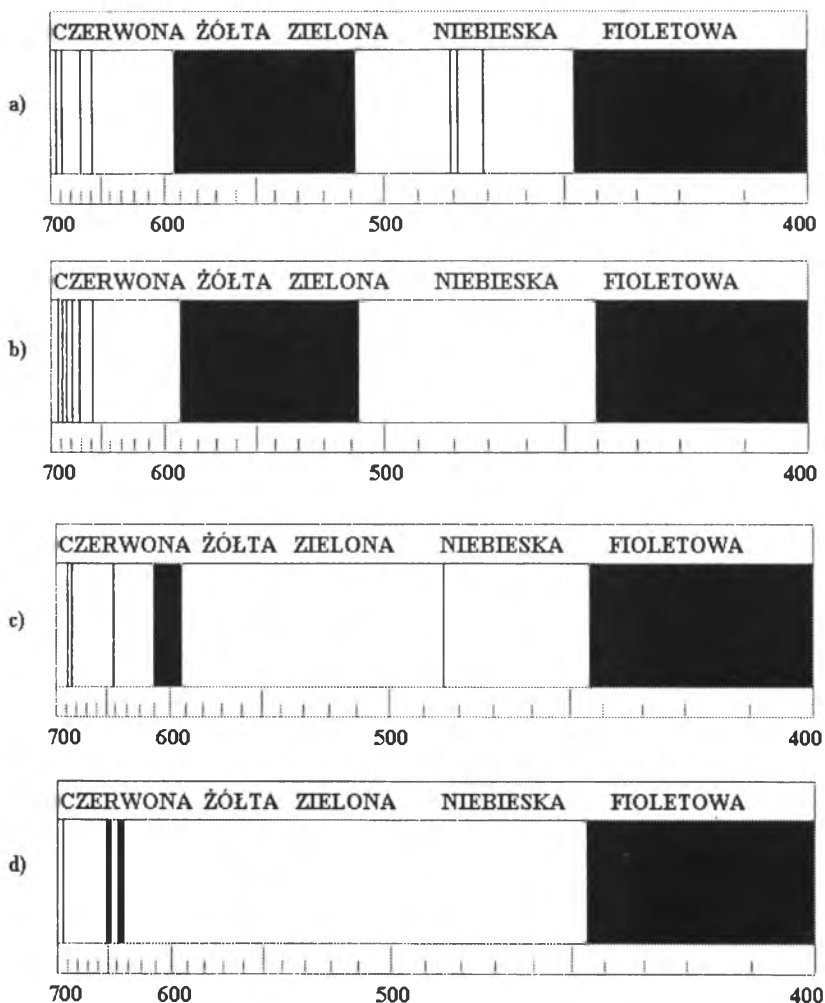
Barwy zasadnicze i dopełniające

Barwa zasadnicza	Długość fali [nm]	Barwa dopełniająca	Długość fali [nm]
Fioletowa	400—440	żółta	570—572
Indygo	440—470	żółta	572—575
Błękitna	470—480	żółtopomarańczowa	575—580
Niebieska	480—490	żółtopomarańczowa	580—600
Niebieskozielona	490—495	pomarańczowoczerwona	600—700
Zielona	495—560	czerwonopurpurowa	*
Zielonożółta	560—570	purpurowofioletowa	*
Żółta	570—575	fioletowa i indygo	400—470
Żółtopomarańczowa	575—590	błękitnoniebieska	470—486
Pomarańczowa	590—600	niebieska	486—490
Pomarańczowoczerwona	600—620	niebieskozielona	490—493
Czerwona	620—700	niebieskozielona	493—495

* Barwy z grupy purpurowych nie występują w widmie światła białego.

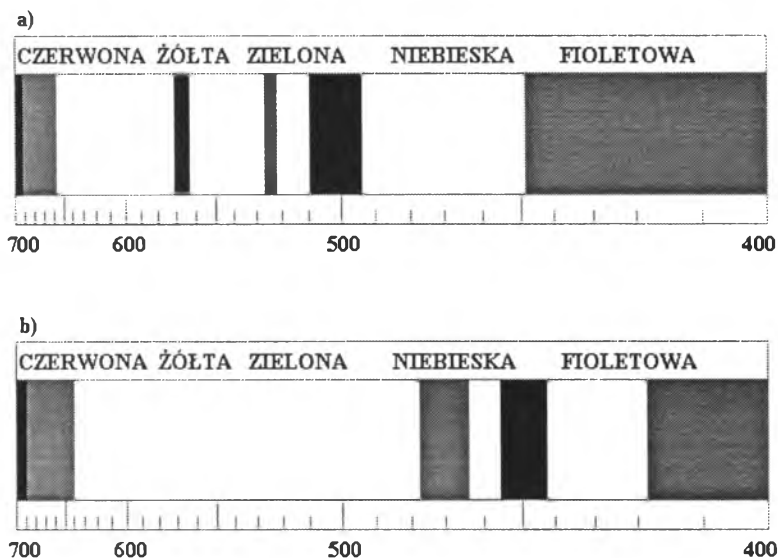
Spektroskop niejednokrotnie pozwala ujawnić wpływ pierwiastków przejściowych występujących w roli chromoforów na absorpcję promieniowania elektromagnetycznego przez obiekty gemmologiczne. Dzięki temu badaniu możliwe jest pośrednie określenie ich składu, co znacznie ułatwia późniejszą identyfikację badanego obiektu gemmologicznego. Prążki absorpcyjne niektórych z tych pierwiastków są bardzo charakterystyczne:

- Prążki absorpcyjne chromu (rys. 115) plasują się głównie w czerwonym odcinku widma optycznego. W tej części widma najmocniejszy jest dublet (dwa prążki obok siebie). Towarzyszy mu kilka słabszych prążków sięgających w pomarańczowy odcinek widma. Chrom charakteryzuje także rozległe pasmo absorpcji znajdujące się w centralnej części widma (w żółtym lub zielonym jego odcinku), a fiolet z reguły jest absorbowany w całości. Niekiedy są widoczne także słabe prążki absorpcyjne w niebieskim odcinku widma. Pewne obiekty zawierające chrom mogą także wykazywać obecność prążków emisyjnych (fluorescencyjnych). Na przykład w korundzie (rubinie) emisyjne prążki chromu występują tylko w świetle odbitym. W spinelu prążki emisyjne chromu są dość liczne i intensywne, szczególnie w obiektach silnie barwnych.

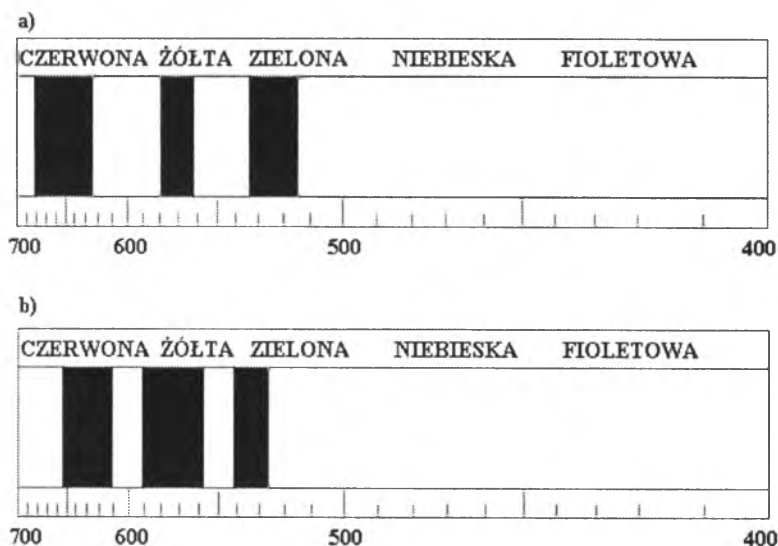


Rys. 115. Widma absorpcyjne chromu w: a) rubinie, b) czerwonym spinelu, c) szmaragdzie, d) granacie (demantoid) (wg Payette, 1994)

- Przejawy absorpcji wywołanej obecnością żelaza nie są zbyt wyraziste. Pasma absorpcji sytuują się głównie w zielonym i niebieskim odcinku widma (rys. 116). W rezultacie barwy związane z obecnością żelaza w obiekcie gemologicznym nie są tak wyraziste jak uwarunkowane obecnością chromu. Najczęściej jest to barwa czerwona lub zielona. Żelazo może również powodować powstanie barwy żółtej lub niebieskiej, np. jony żelaza dwuwartościowego są odpowiedzialne za niebieską barwę spinelu, purpurę almandynu i zielen oliwinu, jony żelaza trójwartościowego zaś są powodem żółtej i zielonej barwy chryzoberylu, zielonej barwy korundu (zielonego szafiru) i niebieskiej barwy berylu (akwamarynu).



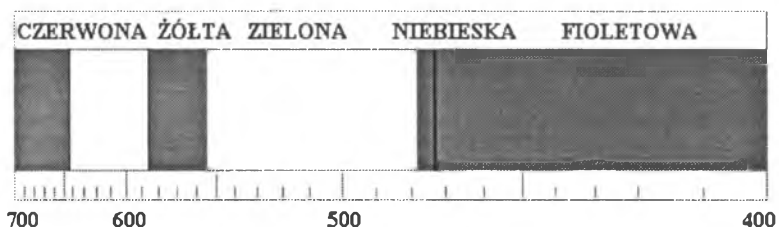
Rys. 116. Widma absorpcyjne żelaza w: a) granacie (almandynie), b) zielonym szafirze (wg Payette, 1994)



Rys. 117. Widma absorpcyjne kobaltu w: a) szkle barwionym kobaltem, b) niebieskim syntetycznym spinelu (wg Payette, 1994)

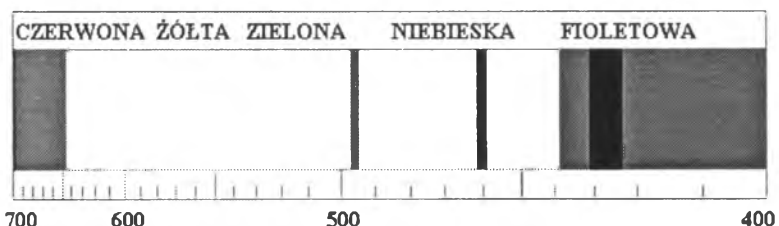
- Widmo kobaltu jest bardzo charakterystyczne i składa się z trzech szerokich prążków absorpcyjnych występujących w żółtej, zielonej i czerwonej części widma (rys. 117).

- Wanad daje tylko jeden prążek absorpcyjny plasujący się w niebieskim odcinku widma (rys. 118). Pierwiastek ten bywa stosowany do barwienia syntetycznego korundu celem imitowania chryzoberylu (aleksandrytu).



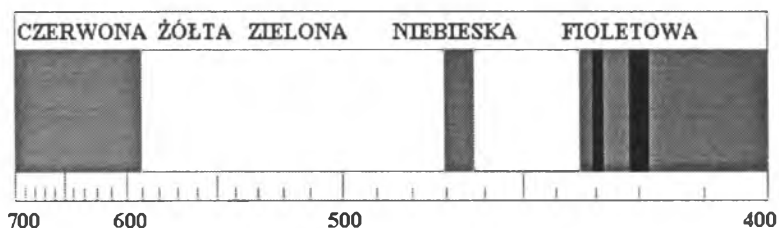
Rys. 118. Widmo absorpcyjne wanadu w syntetycznym korundzie imitującym aleksandryt (wg Payette, 1994)

- Pasma absorpcyjne manganu można odnaleźć w fioletowym i niebieskim odcinku widma optycznego (rys. 119). Materiały zawierające barwę manganowi mają przeważnie barwę różową lub pomarańczową.



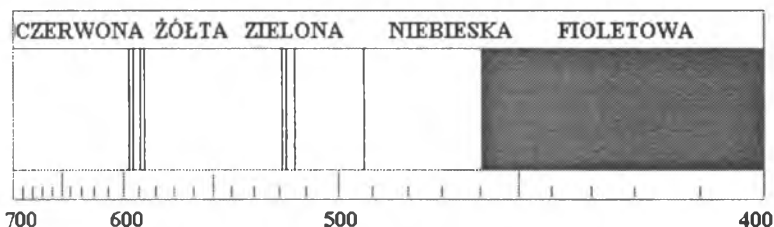
Rys. 119. Widmo absorpcyjne manganu w spessartycie (granat) (wg Payette, 1994)

- Miedź, tytan i nikiel nie dają zazwyczaj wyraźnych prążków absorpcyjnych. Wyjątkiem jest miedź w turkusie i azurycie, gdzie daje dwa wyraźne pasma absorpcji w fioletowym odcinku widma (rys. 120). Są one szczególnie dobrze widoczne w świetle odbitym.



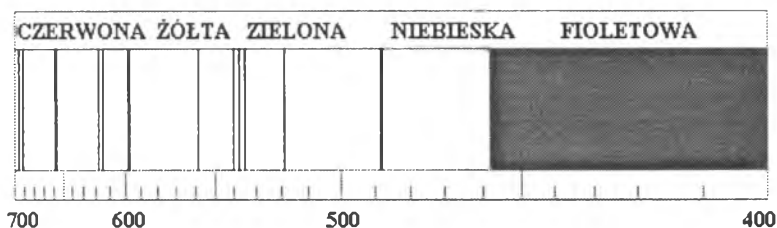
Rys. 120. Widmo absorpcyjne miedzi w turkusie (wg Payette, 1994)

● Obecność pierwiastków ziem rzadkich (Pr — prazeodym i Ne — neodym) może się zaznaczać charakterystycznym widmem (tzw. didymium) polegającym na występowaniu grup wąskich prążków absorpcji umiejscowionych w zielonym i żółtym odcinku widma (rys. 121), np. w apatycie, YAG-u, cyrkonie.



Rys. 121. Widmo absorpcyjne neodymu w żółtym apatycie (wg Payette, 1994)

● Prążki absorpcyjne uranu są liczne, wyraziste i dość równomiernie rozmieszczone w widmie; jedynym naturalnym materiałem gemmologicznym o większym udziale uranu jest zwykle cyrkon (rys. 122).



Rys. 122. Widmo absorpcyjne uranu w cyrkonie (wg Payette, 1994)

Wykrycie występowania nieoczekiwanego chromoforu w materiale gemmologicznym może być bardzo pomocne w ujawnieniu:

- materiału syntetycznego,
- materiału traktowanego,
- zastosowanego barwnika (tab. 18).

Geneza barwy wybranych materiałów gemmologicznych

Material	Barwa	Przyczyna barwy
Aktynolit	zielonożółta do zielonej (nefryt)	Fe^{2+} , koordynacja oktaedryczna
	zielona	Cr^{3+} , ślady
Almandyn	czerwona	Fe^{2+} , koordynacja kubiczna zdeformowana
Andaluzyt	pleochroizm zielona i brunatna	$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$ (transfer ładunku)
Andradyt	wielobarwny	dyfrakcja światła
	żółtozielona	Fe^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	zielona (demantoid)	Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	żółta (topazolit) do czarnej (melanit)	transfer ładunku oraz absorpcja wywołana zanieczyszczeniami Fe i Ti
Antofyllit i gedryt	wielobarwny	dyfrakcja światła (iryzacja)
Apatyt	różowa	centrum barwne F (luka z jednym elektronem)
	niebieska	$\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Mn}^{5+}$ (transfer ładunku)
Apofyllit	zielona	V^{4+} , koordynacja oktaedryczna zdeformowana
Aksinit	niebieska	V^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	brunatna	Fe^{2+}
Azuryt	niebieska	Cu^{2+} , koordynacja oktaedryczna wydłużona
Benitoit	niebieska	$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$ (transfer ładunku)
Beryl	ciemnoniebieska	centrum barwne CO_3^- i NO_3 (napromieniowanie)
	niebieskawa (akwamaryn)	Fe^{2+} (w kanalikach sieci krystalicznej)
	niebieska (akwamaryn)	$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$
	zielona: żółta + niebieska	$\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ (transfer ładunku) i Fe^{2+} w sieci krystalicznej
	zielona (szmaragd) i zielonawa	Cr^{3+} i/lub V^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	żółta do pomarańczowej (heliodor)	$\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ (transfer ładunku)
	czerwona	Mn^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	różowa (morganit)	Mn^{2+} , koordynacja oktaedryczna
Bursztyn	niebieska do zielonej	fluorescencja pod wpływem światła widzialnego
	niebieska (bursztyn bałtycki)	dyfuzja światła

Material	Barwa	Przyczyna barwy
Chalcedon	purpurowa	mikroskopijne inkluzje sugilitu
	niebieska do niebiesko-zielonej	mikroskopijne inkluzje chryzokoli
	zielona (chryzopraz)	mikroskopijne inkluzje niklonośnych minerałów ilastych
	pomarańczowa do różowej	mikroskopijne inkluzje uwodnionych tlenków
	(jaspis, karneol)	Fe
Chryzoberyl	żółta	Fe^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	efekt aleksandrytu	Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna
Chryzokola	niebieska	Cu^{2+} , koordynacja oktaedryczna
Cyrkon	niebieska	U^{4+}
Diament	purpurowa, różowa, czerwona	defekty struktury o nie ustalonej naturze
	niebieska	rozproszone atomy boru
	zielona	centra barwne (zwykle agregaty dwóch lub czterech atomów azotu) i/lub błędy struktury
	żółta	centrum barwne (agregat trzech atomów azotu)
	pomarańczowa	centrum barwne (luka w agregacie azotu)
Diopfaz	zielona	Cu^{2+} , koordynacja oktaedryczna
Dysten	niebieska	$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ (transfer ładunków) i Cr^{3+} (ślady, koordynacja oktaedryczna)
	zielonawa	V^{3+} , koordynacja oktaedryczna Fe^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	zmienna barwa	Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna
Drawit	brunatna	$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{4+}$ (transfer ładunków)
Elbait	niebieska	Fe^{2+} , koordynacja oktaedryczna
	żółtozielona	Mn^{2+} , koordynacja oktaedryczna
	brunatna	$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$ (transfer ładunku)
	różowa do czerwonej (rubelit)	Mn^{3+} , koordynacja oktaedryczna (napromieniowanie)
Enstatyt	brunatnozielonawa	Fe^{2+}
	zielona	Fe^{2+} z domieszką Cr^{3+}
Epidot	pleochroizm, zielony i brunatny	Fe^{3+} , koordynacja oktaedryczna zdeformowana

Material	Barwa	Przyczyna barwy
Euklaz	zielona	Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	niebieska	$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ (transfer ładunku)
Fluoryt	fioletowa	dyfuzja (mikroskopijne inkluzje kalcytu)
	niebieska	Y^{3+} + luka po F + 2 elektrony
	zielona	Sm^{2+}
	żółtozielonawa	centrum barwne zawierające Y i Ce powiązane z luką po F
	żółta	centrum barwne $\text{O}_3^- = \text{O}_2$ zastępujące F
	różowa	centrum barwne $\text{YO}_2 (\text{Y}^{3+} + \text{O}_2^{3-})$
Gahnit i ganospinel	niebieska	Fe^{2+} , koordynacja tetraedryczna
Glaukofan	niebieska	$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ (transfer ładunku)
Grossular	zielona (tsavoryt)	V^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	pomarańczowa (hessonit)	Mn^{2+} , koordynacja kubiczna zdeformowana, Fe^{3+}
Hematyt	szary w świetle odbitym, czerwony w świetle przechodzącym	Fe^{3+}
Hornblenda	zielona do brunatnej	Fe^{2+} (w różnym położeniu w sieci krystalicznej)
Hydrogrossular	zielona (żad transwalski)	Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	różowa	Mn^{3+} , koordynacja oktaedryczna
Jadeit	zielona („imperial”)	Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	żółtozielona	Fe^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	fioletowa	$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ (transfer ładunku); syntetyczny barwiony Mn^{3+}
Kalcyt	różowa	Co^{2+}
Koral	niebieska, różowa, czerwona, czarna	pigmenty organiczne
Kordieryt	fioletowa do niebieskiej	$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ (transfer ładunku)
	czerwona	inkluzje hematytu i/lub lepidokrokitu
Kornerupin	niebieska	Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	zielona	V^{3+} , koordynacja oktaedryczna
Korund	purpurowa	$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$ (transfer ładunku) i obecność Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	niebieska	$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$ (transfer ładunku) modyfikowany przez $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ (transfer ładunku)

Material	Barwa	Przyczyna barwy
Korund (cd.)	żółta	$O^{2-} \rightarrow Fe^{3+}$ (transfer ładunku); Fe^{3+} i Ti^{3+} ; różne niestabilne centra barwne o nie ustalonej strukturze
	pomarańczowa do brunatnej	Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna i centrum barwne: udział Fe^{3+}
	różowopomarańczowa (padparadża)	Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna i centrum barwne; Cr^{4+} , koordynacja oktaedryczna i Mg^{2+} zastępują dwa jony Al^{3+} w strukturze krystalicznej
	czerwona (rubin)	Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna oraz udział małej ilości V^{3+} i Fe^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	różowa	Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	zmienna barwa	Cr^{3+} i/lub Fe^{3+} , koordynacja oktaedryczna; różne koncentracje
Kwarc	fioletowa do purpurowej	$O^{2-} \rightarrow Fe^{4+}$ (transfer ładunku) + napromienianie
	niebieska	mikroskopijne inkluzje niebieskiego dumortierytu, turmalinu lub ilmenitu
	zielona (praziolit)	Fe^{2+}
	zielona (awenturyn)	inkluzje fuschytu (mika chromowa)
	żółtozielonawa	centrum barwne
	żółta do pomarańczowej (cytryn)	$O^{2-} \rightarrow Fe^{3+}$ (transfer ładunku); różne centra barwne z udziałem Al^{3+}
	dymna	centrum barwne z udziałem Al^{3+}
	różowa	transfer ładunku między Ti^{4+} i Ti^{3+} ; centra barwne z udziałem O^{-} , Al^{3+} i P; inkluzje dumortierytu
	mleczna	dyfuzja światła przez inkluzje
Labradyt	wielobarwny	dyfrakcja światła przez strukturę wewnętrzną
	czerwona	mikroskopijne inkluzje miedzi rodzimej
	pleochroiczna zielona i pomarańczowa	Cu^{+}
Lazulit	niebieska	$Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ (transfer ładunku)
Lazuryt	niebieska (lapis-lazuli)	S_3 (transfer ładunku)
Malachit	zielona	Cu^{2+} , koordynacja oktaedryczna
Mikroklin	niebieska (amazonit)	centrum barwne (Pb^{3+} i H_2O)

Material	Barwa	Przyczyna barwy
Oligoklaz	niebieska (kamień księżycowy)	dyfuzja światła przez strukturę wewnętrzną
	czerwona (kamień słoneczny)	awenturyscencja prowokowana przez inkluzje lepidokrokitu lub hematytu
Oliwin	zielonożółty	Fe^{2+} , koordynacja oktaedryczna
	zielony	Fe^{2+} i śladowe ilości Cr^{3+} w koordynacji oktaedrycznej
Opal	wielobarwny (szlachetny)	dyfrakcja przez strukturę wewnętrzną
	pomarańczowa do czerwonej	mikroskopijne inkluzje uwodnionych tlenków żelaza
	zielona (praz)	mikroskopijne inkluzje niklonośnych minerałów ilastych
Ortoklaz	żółta	Fe^{3+} , koordynacja tetraedryczna
	różowa do czerwonej	mikroskopijne inkluzje hematytu i/lub lepidokrokitu
Perła	różne barwy	pigmenty organiczne (porfiryny)
Piemontyt	czerwonopurpurowa	Mn^{3+} , koordynacja oktaedryczna
Plagioklasy	niebieska	centrum barwne (Pb i H_2O)
Pirop	czerwona do brunatnej	Fe^{2+} , koordynacja kubiczna zdeformowana
	czerwona	Fe^{2+} , koordynacja kubiczna zdeformowana oraz Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	zmienna barwa	V^{3+} i/lub Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna
Rodochrozyt	różowa do czerwonej	Mn^{2+} , koordynacja oktaedryczna
Rodonit	różowa	Mn^{2+} , koordynacja oktaedryczna
Rutyl	niebieska (rutyl syntetyczny)	Ti^{3+}
Scheelit	żółta	Fe
Serpentyny	zielona	Cr^{3+} wokół inkluzji chromitu
Sylimanit	niebieska	$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$ (transfer ładunku)
	żółta	Fe^{3+} lub Cr^{3+} w koordynacji tetraedrycznej
	brunatna	Fe^{3+} i inkluzje faz bogatych w żelazo
Sinhalit	brunatna	$\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ (transfer ładunku) i Fe^{2+} , koordynacja oktaedryczna
Spessartyn	pomarańczowa	Mn^{2+} , koordynacja kubiczna zdeformowana
Sfaleryt	żółty do czarnego	transfer ładunku między żelazem i siarką
	zielona	CO^{2+} , koordynacja tetraedryczna

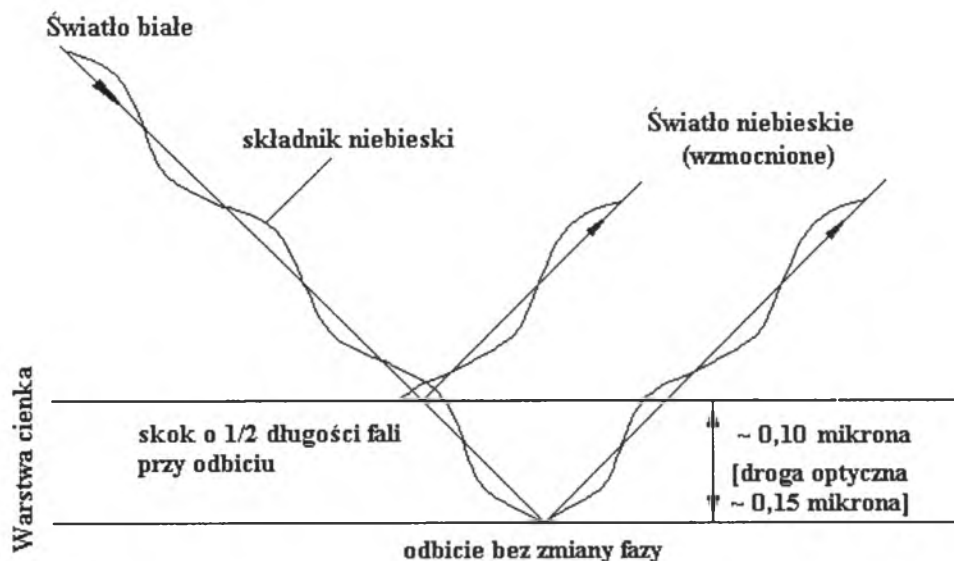
Material	Barwa	Przyczyna barwy
Spinel	fioletowa do purpurowej	Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna i Fe^{2+} , koordynacja tetraedryczna
	niebieska	Co^{2+} i Fe^{2+} , koordynacja tetraedryczna
	zielononiebieskawa	Fe^{3+} i Fe^{2+} , koordynacja tetraedryczna
	zielona (syntetyk)	Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	różowa do czerwonej	Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna
Spodumen	purpurowa do różowej (kunzyt)	Mn^{3+} , koordynacja tetraedryczna, Mn^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	zielona (hiddenit)	Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna i centrum barwne z udziałem Mn^{4+} ; V^{3+} , koordynacja oktaedryczna
Staurolit	brunatna	Fe^{2+} , koordynacja tetraedryczna
	niebieska	Co^{2+} , koordynacja tetraedryczna
Sugilit	purpurowa	Mn^{3+} i Fe^{3+} , koordynacja oktaedryczna
Taaffeit	czerwona do fioletowej	Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna
Tektyt	zielonawożółta (mołdawit)	Fe^{2+} , koordynacja oktaedryczna
	brunatna	Fe^{3+} , koordynacja oktaedryczna
Tytanit	zielona	znaczna zawartość żelaza
	zielona (tytanit chromowy)	Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	różowa	Mn^{2+} , koordynacja oktaedryczna; inkluzje różowego węgla
Topaz	niebieska	centrum barwne o nieznannej strukturze
	zielona	centrum barwne żółte i niebieskie
	żółta	centrum barwne o nieznannej strukturze
	pomarańczowa	centrum barwne żółte i Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	różowa	Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna
Tremolit	różowa	Mn^{3+}
Turkus	niebieska	Cu^{2+} , koordynacja oktaedryczna
Uwarowit	zielona	Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	czerwona	centra barwne z udziałem Nb^{4+}
Zoizyt	niebieska (tanzanit traktowany)	V^{4+} , koordynacja oktaedryczna oraz V^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	brunatnofioletowa	V^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	zielona	Cr^{3+} , koordynacja oktaedryczna
	różowa (thulit)	Mn^{3+} , koordynacja oktaedryczna

3.4.4.2. Specjalne efekty optyczne

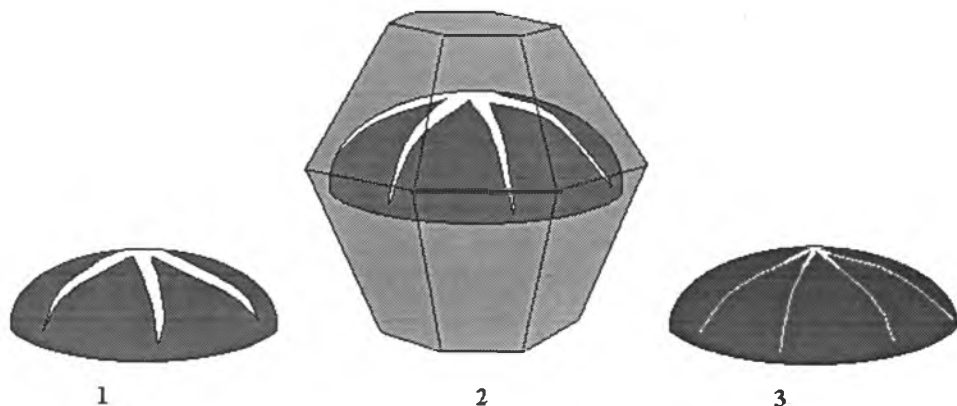
Przyczyną powstawania specyficznych plam, wstęg, smug i refleksów świetlnych w niektórych materiałach i obiektach gemmologicznych są zjawiska odbicia, załamania, rozproszenia, interferencji, dyspersji i dyfrakcji światła spowodowane ich niejednorodną budową. Powodują one wytworzenie się dodatkowych efektów optycznych wpływających niejednokrotnie korzystnie na walory estetyczne i atrakcyjność materiału gemmologicznego. Efekty mogą być również wytwarzane lub stymulowane procesami inicjowanymi i kontrolowanymi przez człowieka, jak np. iryzacja, opalizacja, asteryzm, kocie oko.

Adularescencja. Jest to typowy efekt optyczny adularu (kamienia księżycowego). Zjawisko polega na występowaniu błękitnego refleksu świetlnego wydobywającego się z materiału obrobionego w formie kaboszonu lub sfery. Refleks ten wydaje się ślizgać po powierzchni obiektu podczas jego ruchu. Powstanie owej niebieskawej świetlistej smugi jest rezultatem interferencji światła odbitego od kolejnych warstwek struktury lamelkowej adularu (rys. 123). Adularescencję można traktować jak szczególny przypadek iryzacji.

Asteryzm (gwiaździstość). Jest to często spotykany efekt optyczny w korundzie (rubin, szafir), granacie i diopsydzie. Bywa spotykany również w innych materiałach. Zjawisko polega na występowaniu świetlistej gwiazdy złożonej z przecinających się w jednym punkcie smug świetlnych (rys. 124). Występuje w obiektach obrobionych w formie kaboszonu lub sfery. Świetlista gwiazda może być cztero-, sześć- lub dwunastoramienna. Przyczyną asteryzmu jest



146 Rys. 123. Powstawanie niebieskawej barwy refleksu świetlnego odbitego od cienkiej warstwy struktury lamelkowej



Rys. 124. Asteryzm korundu (wg Maślankiewicza, 1982)

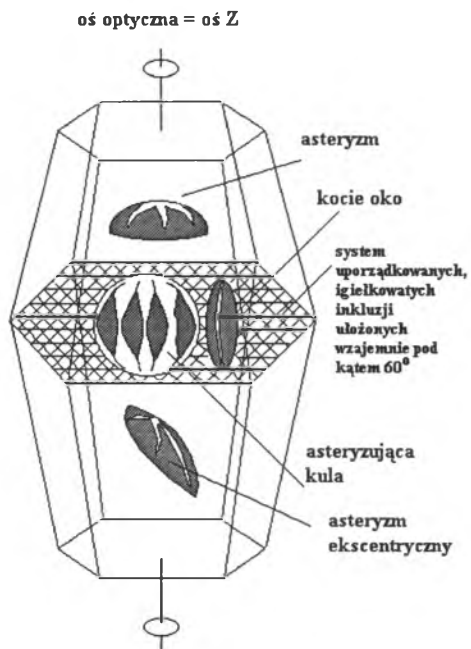
1 — rubinu, 2 — pozycja asteryzującego kaboszonu w kryształ korundu, 3 — szafiru

występowanie w takim obiekcie kilku systemów igiełkowatych lub włóknistych inkluzji rozmieszczonych w uporządkowany sposób w strukturze kryształu, np. przecinających się pod kątem 120° w gwieździe sześcioramiennej lub 90° w gwieździe czteroramiennej. Owe inkluzje dokonują odbicia i dyfrakcji światła w taki sposób, że promienie światła odbitego przestają być równoległe i skupiają się w kilka przecinających się wzajemnie świetlistych smug. Wyrazistość świetlistych smug zależy od stopnia uporządkowania inkluzji. Jeśli inkluzje nie są dostatecznie uporządkowane, to świetlista gwiazda jest zdeformowana adekwatnie do stopnia uporządkowania i przypomina koło zębate lub świetliste gniazdo. Liczba ramion i wygląd świetlistej gwiazdy zależy od symetrii krystalograficznej obiektu wykazującego asteryzm. Na jej wygląd istotny wpływ ma orientacja obiektu w bryle obrabianego kryształu oraz forma zastosowanego szlif (rys. 125).

Awenturyscencja. Jest to gra refleksów świetlnych, często wielobarwnych i metalicznie połyskujących, powstających przez odbicie światła od niewielkich inkluzji o pokroju blaszkowym lub płytkowym, występująca także w materiale nieprzeźrystym. Inkluzje mogą być rozmieszczone bezładnie, np. w szkłe awenturynowym lub podobnie zorientowane względem pewnych płaszczyzn symetrii kryształu, np. w oligoklazie (kamieniu słonecznym). Zjawisko to spotyka się dość często w:

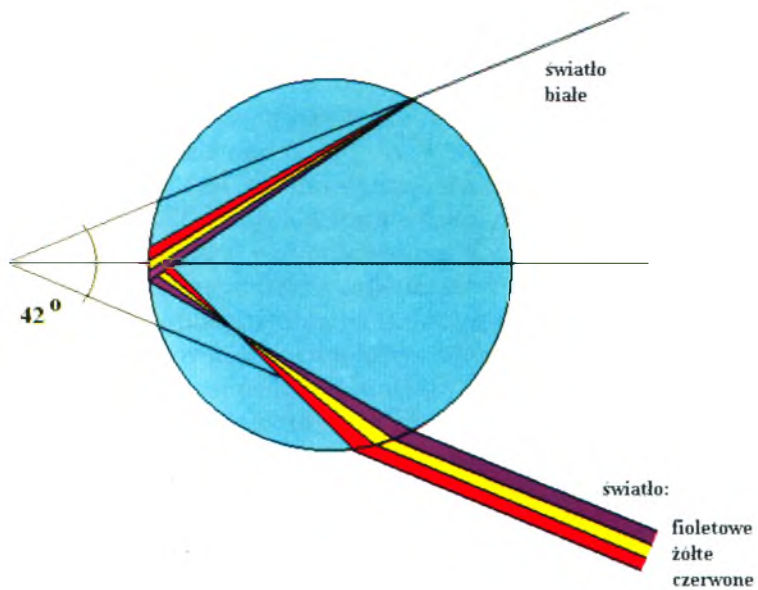
- kwarcu (kwarc awenturynowy), w którym odbicia światła dokonują łuseczkowate wtrącenia hematytu,
- kwarcu (awenturynie), w którym odbicia światła dokonują wtrącenia zielonawej miki (fuschytu),
- oligoklazie (kamieniu słonecznym), w którym odbicia światła dokonują wtrącenia łuseczkowatego hematytu lub goethytu.

Iryzacja (mienienie się barwami tęczy). Jest to dekompozycja światła białego spowodowana wielokrotnym załamaniem i odbiciem oraz interferencją w pew-

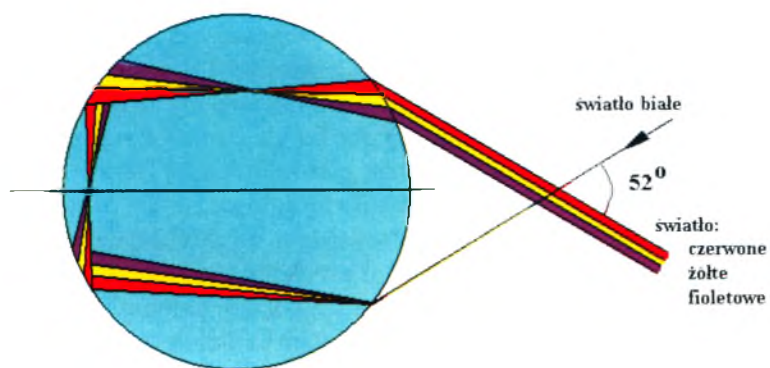


Rys. 125. Zależność barwnych efektów optycznych kaboszonu od jego położenia we wnętrzu kryształu wyposażonego w inkluzje rozmieszczone w uporządkowanych systemach (na przykładzie korundu)

nich strukturach krystalicznych o właściwościach cienkich błonek i przekształcenia go w zestaw barw tęczy. Zjawisko iryzacji jest w jakimś stopniu podobne do zjawiska tęczy, które powstaje w wyniku załamania i odbicia promieni słonecznych w kroplach wody deszczowej, co pociąga za sobą rozkład światła białego na wielobarwną wiązkę, gdyż każda z fal elektromagnetycznych wchodzących w skład widma słonecznego załamuje się w wodzie pod nieco innym kątem (dyspersja światła). Promień światła słonecznego wnikający do sferycznej kropli wody deszczowej ulega najpierw załamaniu, potem odbiciu od wewnętrznej powierzchni kropli, która zachowuje się jak lustro wklęsłe, a następnie ponownemu załamaniu przy wyjściu (rys. 126). Przy każdym załamaniu zachodzi również dyspersja światła, lecz obie dyspersje nie kompensują się tak, jak to jest w przypadku płytki płaskorównoległej, gdyż kropla ma kształt sferyczny. W kropli wody deszczowej może mieć miejsce także drugie odbicie promienia świetlnego (rys. 127). Kropla wody, podobnie jak inne układy optyczne załamujące światło, ma minimalny kąt odchylenia. W przypadku pojedynczego wewnętrznego odbicia wynosi on średnio 42° (od 41° dla światła fioletowego do 43° dla światła czerwonego). W przypadku dwukrotnego wewnętrznego odbicia kąt wynosi 52° (od 50° dla światła czerwonego do 54° dla światła fioletowego). Dekompozycja światła białego (iryzacja) może być spowodowana strukturą materiału gemmologicznego lub charakterem i sposobem rozmieszczenia pewnych inkluzji i powierzchni nieciągłości w tym materiale (np. drobne szczelinki lub ubytki).



Rys. 126. Załamanie i pojedyncze odbicie światła białego w kropki wody

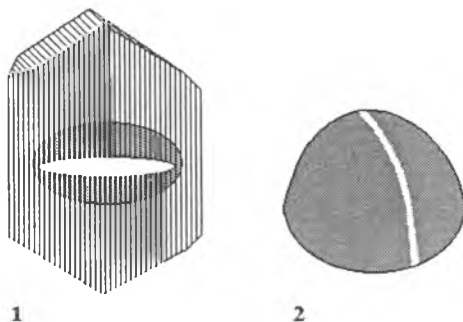


Rys. 127. Załamanie i podwójne odbicie światła białego w kropki wody

Jedwabistość. Jest to rozległy, miękki, jedwabisty refleks świetlny powstający w związku z odbiciem światła od igiełkowatych lub rureczkowatych (mikrokanaliki) wtrąceń rozmieszczonych w obiekcie umiarkowanie równolegle względem siebie. Przy dużym nasyceniu takimi inkluzjami jedwabistość przechodzi stopniowo w kocie oko.

Kocie oko. Jest to pojedynczy dość ostry refleks świetlny powstający w obiektach szlifowanych w formie kaboszonu. Nazwa efektu wynika z tego, że ogólnym wyglądem przypomina on kocie oko (rys. 128). Przyczyną powstawania takiego refleksu świetlnego jest odbicie światła od pęków igiełkowatych, włóknistych lub rureczkowatych inkluzji rozmieszczonych wzajemnie równolegle i równolegle względem krótszej osi kaboszonu oraz względem podstawy kaboszonu. Efekt kociego oka jest spotykany w bardzo wielu materiałach gemmologicznych zawierających wtrącenia spełniające te warunki, jednak najwyżej cenione jest kocie oko chryzoberylowe. Podobny efekt optyczny występujący w kwarcu nazywany jest *tygrysim okiem*. Dość znane i cenione jest także turmalinowe kocie oko.

Rys. 128. Kocie oko chryzoberylowe
(wg Maślankiewicza, 1982)
1 — pozycja kaboszonu w kryształach, 2 — kaboszon z efektem kociego oka

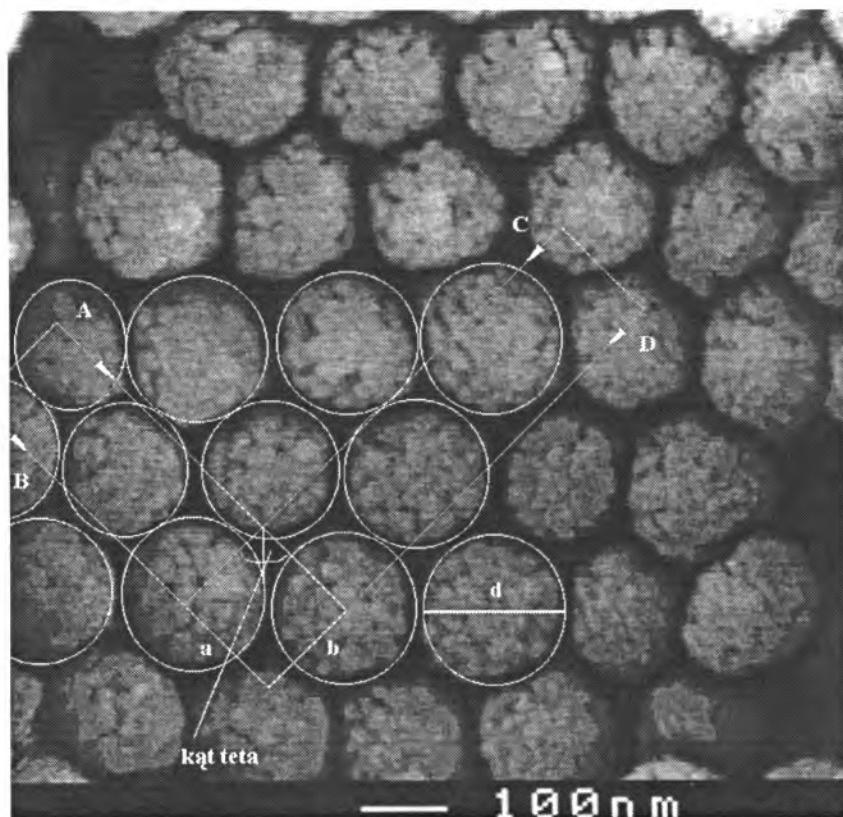


Labradorescencja. Jest to występowanie metalicznych refleksów świetlnych, wśród których dominują refleksy o barwie niebieskiej, zielonej i czerwonej, wywołanych interferencją światła odbitego od bardzo cienkich lametek bliźniaczych lub zrostów wytworzonych przez odmieszanie się krzemianowego roztworu stałego (por. rys. 123). Labradorescencja jest najbardziej wyrazista, gdy miąższość lametek jest mniejsza od długości fali świetlnej. Nazwa tego efektu optycznego wywodzi się od nazwy labradoru (plagioklazu), w którym jest on często obecny i ma najbardziej spektakularny wygląd. Labradorescencję można traktować jak szczególny przypadek iryzacji.

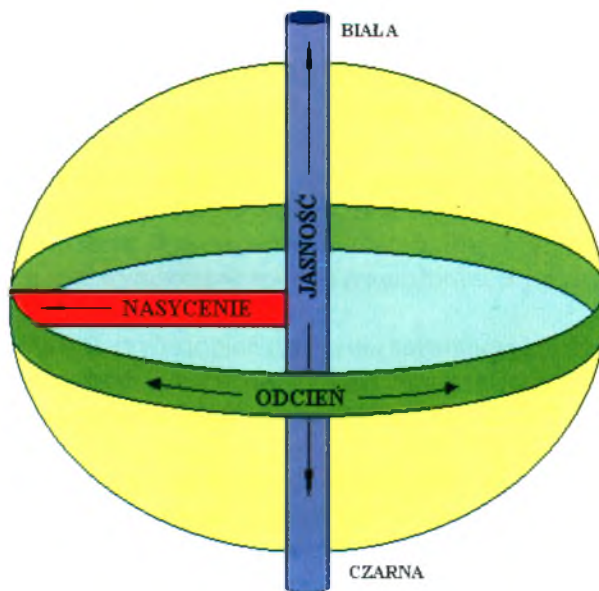
Mleczność. Jest to zjawisko wywołane odbiciem i rozproszeniem światła przez bardzo drobne, niewidoczne gołym okiem, gęsto i bezładnie rozmieszczone inkluzje fluidalne (gazowe i ciekłe). Barwa biała powstała w wyniku tego zjawiska przypomina mleko rozcieńczone wodą i ma błękitnawy odcień. Jednocześnie obiekt w miejscach występowania mleczności staje się nieprzejrzysty. W takiej barwie białej dominują fale krótsze (niebieski odcinek widma 149

widzialnego). Najczęściej zjawisko to obserwowane jest w kwarcu (kwarc mleczny). W chalcedonie i opalu bywa określane mianem *opalescencji* i jest prawdopodobnie spowodowane odbiciem i rozproszeniem światła na słabo uporządkowanych sferycznych skupieniach krzemionki, gdy w świetle odbitym przeważają fale krótsze.

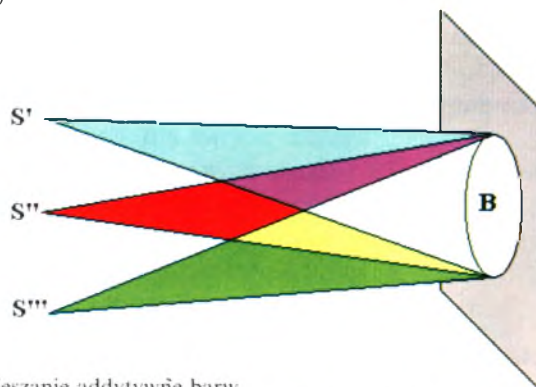
Opalizacja. Jest to efekt charakterystyczny dla opalu szlachetnego. Wywołany jest załamaniem, odbiciem i interferencją światła w zwartych, uporządkowanych strukturach, złożonych z tworzących opal szlachetny sferycznych skupień krzemionki (rys. 129). Barwa opalizacji zależy od kąta obserwacji i ulega zmianie wraz ze zmianą tego kąta, np. przez niewielką rotację obiektu. Barwa opalizacji może się zmieniać również wskutek zmiany kąta, pod jakim oświetlany jest obserwowany obiekt, np. wskutek przemieszczenia źródła światła. Zjawisko opalizacji stanowi szczególny przypadek iryzacji.



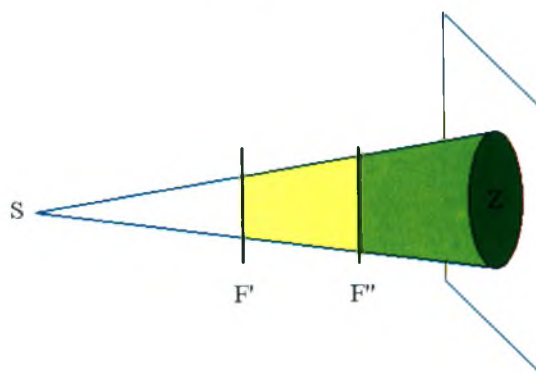
Rys. 129. Załamanie, odbicie i interferencja światła w warstewkach opalu szlachetnego złożonego z sferycznych skupień krzemionki; wielkość sfer krzemionkowych 150—300 nm. Barwa powstaje, gdy promienie światła załamanego i odbitego (C, D) są zgodne w fazie, tzn. gdy różnica drogi przebytej między AB i CD jest równa $a + b$ lub $2d \sin \theta$. Zróżnicowanie obserwowanych barw zależy także od kąta, pod którym dokonuje się obserwacji



Rys. 130. Atrybuty barwy — sfera barw; odcień zmienia się na obwodzie równika sfery barw, nasycenie wzrasta ku brzegom sfery barw, a jasność zmienia się w kierunku biegunów sfery barw (wg Kinga i inn., 1994)



Rys. 131. Mieszanie addytywne barw
 S_1 — niebieska, S_2 — czerwona, S_3 — zielona, B — biała (wg Zausznicy, 1959)



Rys. 132. Mieszanie subtraktywne barw (wg Zausznicy, 1959)
 F_1 — filtr niebieski, F_2 — filtr żółty, Z — światło zielone, S — światło białe

3.4.4.3. Ocena barwy

Barwę określają jej atrybuty (rys. 130), takie jak:

- **Odcień**, czyli odczuwalny wizualnie kontrast jakościowy między barwami. Wrażenie, w którym rozróżnia się odcień, nazywane jest chromatycznym. Odcień bywa ustalany na podstawie wizualnego porównania z wzorcami naturalnymi. Do gemmologicznych badań porównawczych wykorzystywane są zestawy wzorców wykonywane z materiałów syntetycznych. Nazwa odcienia może być wyrażona w sposób dwuczłonowy, np. trawiaszzielona, jutrzennoczerwona.
- **Nasycenie** (koloryt), czyli stopień nasycenia substancją barwiącą. Z uwagi na nasycenie wyróżniane bywają barwy tzw. matowe (szare lub brązowe do bardzo lekko szarych lub brązowych) i barwy tzw. ostre (średnio mocne do jaskrawych).
- **Jasność**, czyli wrażenie wzrokowe odbierane jako osłabienie światła wysyłanego przez barwę bez zmiany nasycenia i odcienia. Jasność zmienia się wielostopniowo od barw bardzo ciemnych do bardzo jasnych.

Przez zmieszanie w odpowiednich proporcjach trzech barw podstawowych (tzn. czerwonej, niebieskiej i zielonej) można uzyskać każdą barwę. Proces taki jest nazywany mieszaniem addytywnym (rys. 131). Barwę można także uzyskać przez eliminację pewnych długości fal elektromagnetycznych z widma widzialnego. Proces ten jest nazywany mieszaniem subtraktywnym (rys. 132). Eliminacji określonych długości fal elektromagnetycznych dokonuje się zazwyczaj przy użyciu odpowiednich filtrów pochłaniających określone zakresy długości fal elektromagnetycznych z widma światła białego.

Barwa większości ciał spotykanych w naturze jest wynikiem subtraktywnego mieszania barw, czyli produktem absorpcji określonych zakresów widzialnego promieniowania elektromagnetycznego. Barwę obiektu określa ta część widma światła białego, która nie została zaabsorbowana.

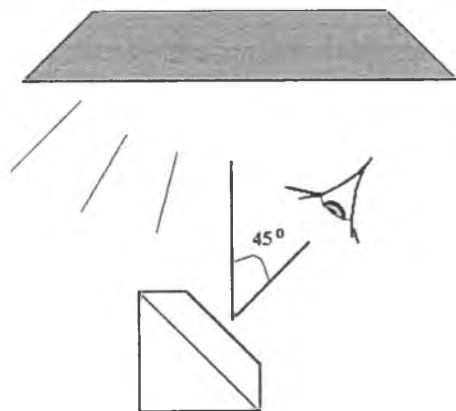
3.4.4.3.1. Porównywanie barw (gemmologiczne komparatory barw)

Ocena barwy materiału gemmologicznego może być wykonana w sposób uproszczony, za pomocą wzorcowego źródła światła C, którym jest rozproszone światło słoneczne tzw. nieba północnego godzin południowych. Do tego celu może być również używane źródło światła sztucznego o charakterystyce zbliżonej do źródła C. Jest to standardowe źródło światła białego o symbolu D-55.

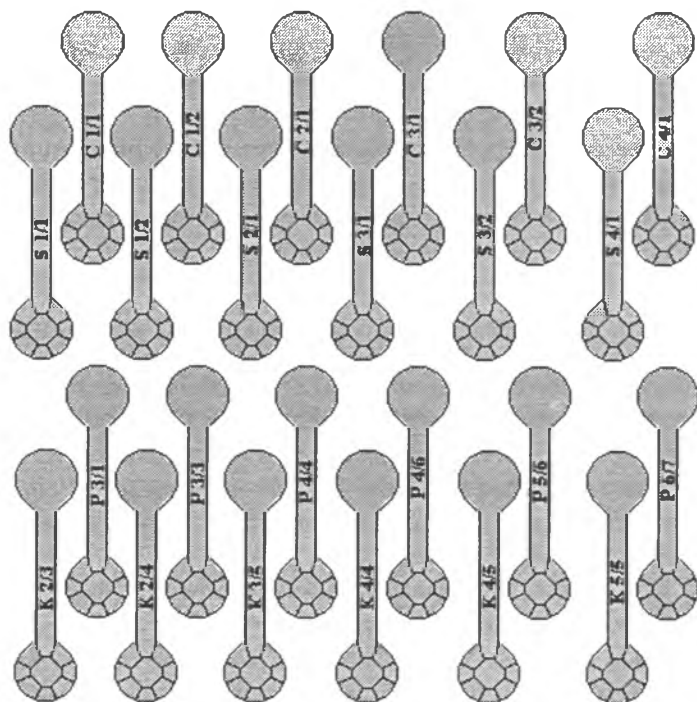
Oceniać barwę obiektów gemmologicznych powinny osoby odpowiednio przeszkolone. Oceny dokonuje się przez porównanie obserwowanej barwy obiektu w miejscu jego największej grubości z przyjętym opisem słownym barw danej grupy materiałów lub z ich wzorcami barwy. Podczas dokonywania oceny obiekt powinien być oświetlony wiązką światła, której odbite promienie powinny biec do oka wykonującego badanie pod kątem 45° względem wiązki 151

oświetlającej (rys. 133). Jest to ocena subiektywna, w której korzysta się z właściwości oka i widzenia barwnego osoby wykonującej badania.

Jednym z najprostszych sposobów mierzących do zobiektywizowania oceny barwy obiektów gemmologicznych jest użycie barwnych zestawów porównawczych (rys. 134). Zasadniczym elementem takiego zestawu są plas-



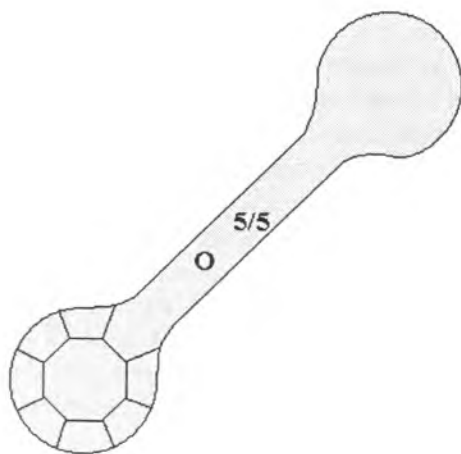
Rys. 133. Warunki obserwacji barwy
(wg Kinga i in., 1994)



Rys. 134. Zestaw porównawczy do wizualnej oceny barwy materiału gemmologicznego złożony z plastikowych wzorców barwy

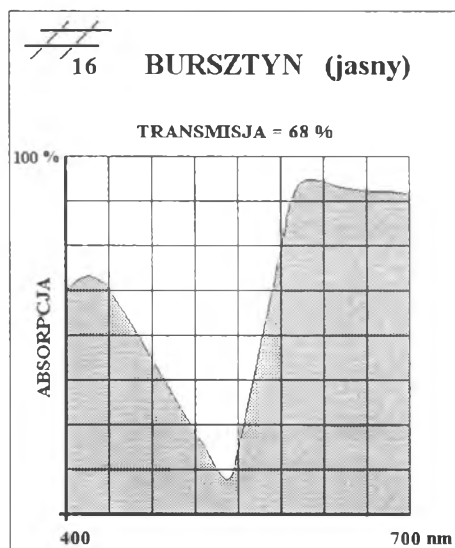
tykowe wzorce (tzw. komparatory jednostkowe) z oznakowaniem ułatwiającym poruszanie się w zestawie (rys. 135). Oznaczenie barwy obiektu odbywa się przez wyszukanie w zestawie takiego wzorca, który wizualnie jest najbardziej podobny do ocenianego materiału (kolorymetria wizualna). Oznakowanie umieszczone na poszczególnych wzorcach pozwala szybko przekazywać jednoznaczną informację o barwie obiektu, np. drogą telefoniczną, teleksową, czy też pocztą elektroniczną. Najprostsze zestawy tego typu zawierają zwykle kilkadziesiąt wzorców uporządkowanych według koloru, tonu i nasycenia. Najbardziej rozbudowane mogą zawierać nawet do kilku tysięcy takich wzorców.

Ekwiwalentnym sposobem obiektywizowania oceny barwy materiału lub obiektu gemmologicznego jest wykorzystanie zestawu przezroczystych filtrów barwnych (rys. 136). Mogą one być łatwo i szybko zestawiane ze sobą w ten sposób, by uzyskana barwa była identyczna z barwą ocenianego obiektu. Każdy filtr zawiera informację o dokonywanej absorpcji, procencie przepuszczalności światła i otrzymanej barwie. Barwa obiektu gemmologicznego stwierdzona za pomocą odpowiedniej konfiguracji filtrów może być kodowana przez zestawienie numerów filtrów użytych do jej uzyskania. W zestawie takim występują 132 filtry plastikowe w postaci spiętych współosiowo, poręcznych, prostokątnych, elastycznych arkuszy folii o wielkości 3 cm × 6 cm. Daje on ogromną liczbę możliwych konfiguracji. Można go stosować zarówno w warunkach światła odbitego, jak i przechodzącego. Czynności konieczne do uzyskania oceny barwy są proste, szybkie i dają dość precyzyjny wynik, który może być szybko prze-



Rys. 135. Plastikowy wzorec barwy materiału gemmologicznego

Symbol wzorca: litera — kolor (np. o — pomarańczowy), pierwsza cyfra — ton, druga cyfra — nasycenie

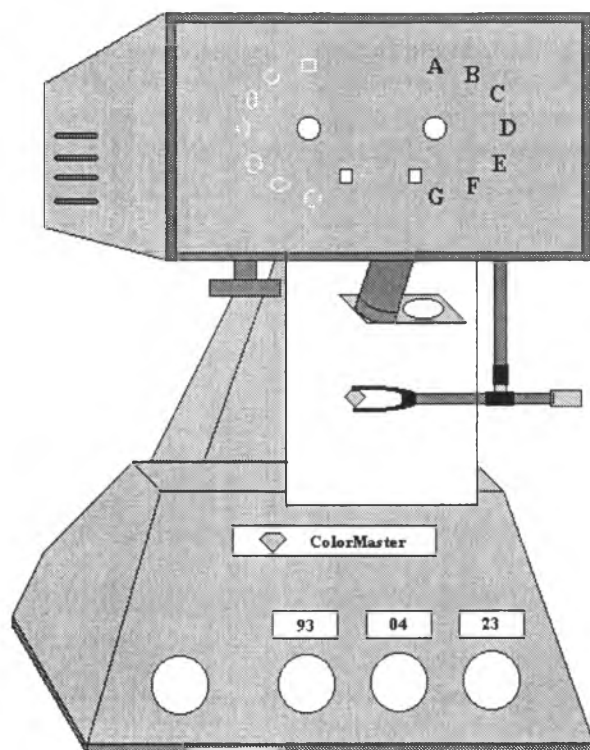


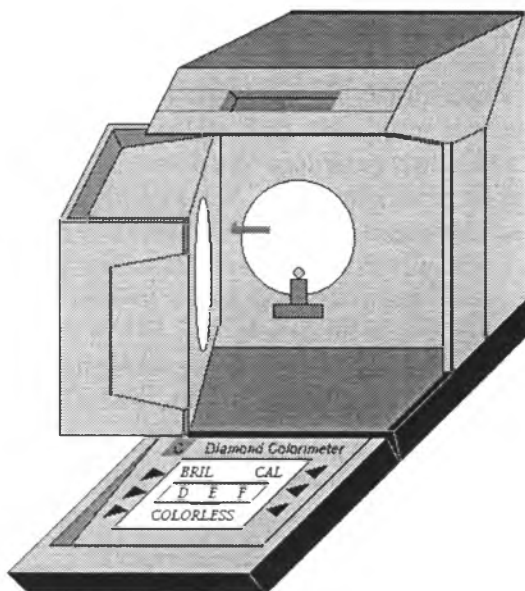
Rys. 136. Filtr barwy do obiektywnej oceny barwy

kazywany na duże odległości, np. drogą telefoniczną, teleksową, pocztą elektroniczną.

Wyniki uzyskiwane metodami subiektywnymi różnią się nieco od otrzymywanych metodami obiektywnymi. Potrzeba uzyskiwania dokładnych, obiektywnych rezultatów zmusza do stosowania kosztownej aparatury pomiarowej, tzw. kolorymetrów. W ofercie handlowej znajduje się kilka tego rodzaju instrumentów, z których największe uznanie znalazły ColorMaster (rys. 137) i Gran Colorimetr (rys. 138) oferowane przez Amerykański Instytut Gemmologiczny. ColorMaster jest przeznaczony do oceny barwy wszystkich obiektów gemmologicznych, wliczając w to również obiekty przeświecające, szlifowane w formie kaboszonu. Gran Colorimetru używa się natomiast do oceny barwy diamentów. Instrument ten wyposażony jest w komputer i program ułatwiający i przyspieszający wykonanie badania, które w rezultacie trwa zaledwie około 10 s. Instrumentem tym mogą być badane diamenty o wielkości od 0,25 karata do 10 karatów. Wynik badania jest przedstawiany w jednej ze standaryzowanych skal barwy (GIA, HRD, CGL itp.).

Najbardziej zaawansowanym technologicznie systemem oceny barwy jest zestaw „Gem 2000”, będący kombinacją wielokanałowego spektrometru i kom-





Rys. 138. Gran ColorMaster

putera z odpowiednim oprogramowaniem. Światło przesyłane jest za pomocą kanałów światłowodowych. Całość oznaczenia nie trwa dłużej niż kilka sekund, a otrzymane rezultaty są powtarzalne. Może być stosowany do obiektywnej oceny barwy diamentów i innych przezroczystych obiektów gemmologicznych. Przyrząd ten spotkał się z przychylną oceną wielu poważnych laboratoriów gemmologicznych. Badaniu tym przyrządem mogą być poddawane obiekty o wielkości 3,5—30 mm. Zastosowany w przyrządzie spektrometr transmisyjny pracuje w zakresie 375—775 nm i jest wyposażony w siatkę holograficzną. Używana wiązka światła monochromatycznego jest wyostrzana z dokładnością do $\pm 0,1$ nm. Spektrometr ten osiąga rozdzielczość optyczną rzędu 2.4 nm. Jako źródło światła używana jest lampa ksenonowa, której światło jest wysyłane za pomocą sfery integracyjnej o średnicy około 60 mm.

3.4.5. Pleochroizm

Absorpcja światła w ciałach izotropowych jest jednakowa we wszystkich kierunkach. Ze względu na to, że natężenie światła przechodzącego przez kryształ jest proporcjonalne do kwadratu amplitudy wektora elektrycznego fali elektromagnetycznej i absorpcja polega na zmniejszeniu się tej amplitudy w miarę przenikania światła przez ośrodek, należy oczekiwać, że w kryształach wartość współczynnika absorpcji (μ) będzie zależna nie tylko od częstotliwości 155

drgań (γ), lecz także od kierunku wektora elektrycznego. Zostało to potwierdzone doświadczalnie.

Przy stałej częstotliwości drgań użytego światła (światło monochromatyczne, γ — constans) obrazem graficznym tych zależności jest elipsoida trójosiowa.

W kryształach z układu regularnego trzy półosie elipsoidy absorpcji są równe i przekształca się ona tym samym w kulę. W takich kryształach, podobnie jak we wszystkich obiektach izotropowych, wartość absorpcji jest wielkością stałą i nie zależy od kierunku przemieszczania się światła w kryształ.

Kryształy należące do pozostałych układów krystalograficznych będą natomiast wykazywały anizotropię absorpcji.

Kryształy z układów: trygonalnego, tetragonalnego i heksagonalnego będą miały obraz absorpcji w postaci elipsoidy obrotowej, której oś obrotu będzie równoległa do osi krystalograficznej Z.

W kryształach z pozostałych układów krystalograficznych (rombowego, jednoskośnego i trójskośnego) elipsoida absorpcji przybiera postać elipsoidy trójosiowej, przy czym w układach:

- rombowym, jej osie pokrywają się z osiami krystalograficznymi X, Y, Z ,
- jednoskośnym, tylko jedna z osi elipsoidy absorpcji pokrywa się z osią krystalograficzną Y kryształu,
- trójskośnym, położenie elipsoidy nie pokrywa się z kierunkami krystalograficznymi w kryształ, ale jest charakterystyczne dla określonego składu chemicznego kryształu i może się przemieszczać adekwatnie do ewentualnych zmian tego składu.

Wielkość absorpcji w kryształach anizotropowych zależy nie tylko od częstotliwości drgań użytego światła, lecz także od kierunku drgań, a więc od kierunku promienia i płaszczyzny polaryzacji.

Absorpcja światła przez kryształy polega na zużywaniu energii fali świetlnej dla wywołania oscylacji elektronów, a nawet atomów i cząstek, np. w zakresie podczerwieni, tkwiących w polu sił sieci krystalicznej. Najwięcej energii pochłaniają te cząstki, których częstota drgań własnych jest bliska częstotliwości padającego światła, a kierunek ich drgań jest równoległy do wektora elektrycznego fali elektromagnetycznej. Ta sama cząstka występująca w sieci krystalicznej może wykonywać niezależne oscylacje o różnych częstotliwościach własnych w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach. Bywa zatem, że dla pewnych częstotliwości światła absorpcja jest bardzo wysoka przy kierunku drgań równoległym do jednej z osi krystalograficznych, a równocześnie znikoma dla drgań odbywających się względem niej prostopadle.

Jeśli taki kryształ wprowadzi się w wiązkę światła spolaryzowanego liniowo, to przy ustawieniach wzajemnie prostopadłych może on bądź to przepuszczać, bądź to nie przepuszczać w pewnym stopniu światła. Jeśli zakres częstotliwości fal świetlnych absorbowanych przez kryształ nie obejmuje całego widma widzialnego, lecz pewne jego pasmo lub pasma, to w świetle przechodzącym wystąpi

było białe). Barwa ta zależy od kierunku drgań i przy obrocie kryształu zauważymy zmianę jej odcienia lub nasycenia czy też jasności. Efekt ten nazywany jest pleochroizmem (polichroizmem, wielobarwnością).

Wyrazistość pleochroizmu zależy od:

- współczynnika absorpcji,
- częstości drgań użytego światła,
- grubości kryształu.

W cienkich płytkach pleochroizm bywa często ledwo zauważalny, podczas gdy w grubszych płytkach tego samego kryształu staje się on już wyraźny lub silny (tab. 19). Są też kryształy, które ujawniają pleochroizm dopiero w dość grubych płytkach, jak np. apatyt, cyrkon, topaz. W niektórych kryształach efekt pleochroizmu jest także widoczny przy użyciu światła nie spolaryzowanego (naturalnego).

Tabela 19

Oznaczenie stopni pleochroizmu

Stopień pleochroizmu	Oznaczenie
Silny	S (<i>strong</i>)
Wyraźny	D (<i>distinct</i>)
Słaby	W (<i>weak</i>)
Bardzo słaby	VW (<i>very weak</i>)
Brak	I (<i>inert</i>)

Do obiektów niepleochroicznych należą wszystkie substancje izotropowe, a więc kryształy z układu regularnego oraz niektóre inne minerały.

Wyróżnia się kryształy pleochroiczne i niepleochroiczne identyfikowane:

- makroskopowo,
- mikroskopowo.

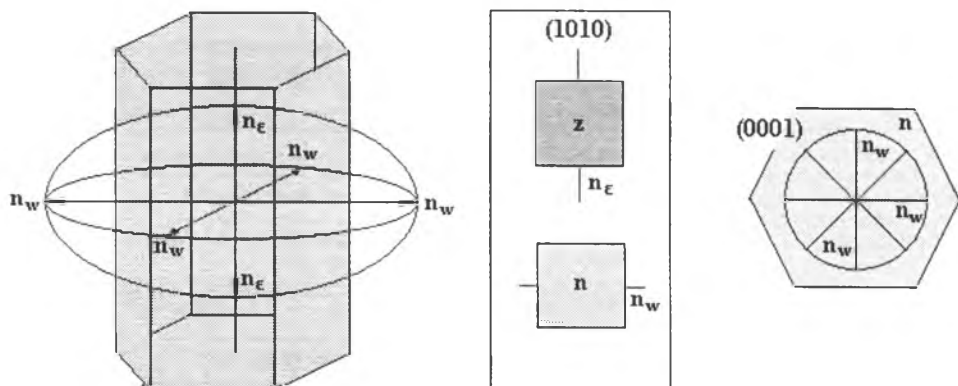
Obie tak wyróżnione grupy nie muszą się w pełni rozdzielać i zależnie od typu obserwacji (mikroskopowych lub makroskopowych) poszczególni ich przedstawiciele mogą zajmować miejsce bądź to w grupie pleochroicznych, bądź to w grupie niepleochroicznych.

W kryształach anizotropowych jednoosiowych optycznie (z układów krystalograficznych trygonalnego, tetragonalnego i heksagonalnego) mogą wystąpić tylko dwie główne barwy pleochroiczne odpowiadające kierunkowo największej różnicy prędkości światła w kryształach (tab. 20). Stąd najdogodniej jest obserwować pleochroizm kryształów jednoosiowych w przekrojach reprezentujących największą różnicę współczynników załamania światła w kryształach (dwójłomność), czyli wówczas, gdy światło pada na kryształ prostopadle do płaszczyzny zawierającej oś krystalograficzną Z (rys. 139). Jeśli światło biegnie przez kryształ jednoosiowy optycznie zgodnie z kierunkiem osi krystalo-

Pleochroizm wybranych materiałów gemmologicznych

Material	Stopień pleochroizmu (wg tab. 19)	Barwa pleochroiczna
<i>Obiekty purpurowe i fioletowe</i>		
Andaluzyt	S	brunatnozielona i ciemnoczerwona do purpurowej
Beryl	D—S	fioletowa i bladofioletowa
Chryzoberyl (aleksandryt)	S	ciemnoczerwonopurpurowa, pomarańczowa i zielonozielona (trichroizm)
Korund (szafir)	S	fioletowa i pomarańczowa
Kwarc (ametyst)	W—D	purpurowa i czerwonopurpurowa
Spodumen (kunzyt)	S	fioletowa do purpurowej i bezbarwna do różowej
Topaz	D—S	jasnopurpurowa do bardzo jasnopurpurowej
Turmalin	S	purpurowa i jasnopurpurowa
<i>Obiekty niebieskie</i>		
Apatyt	S	niebieska i żółta
Benitoit	S	blado- i ciemnoniebieska
Beryl	W—D	jasnoniebieska i ciemnoniebieska
Korund	S	ciemnofioletowoniebieska i jasnozieloniebieska
Kordieryt	S	bezbarwna do żółtej, niebieska i ciemnoniebiesko-fioletowa (trichroizm)
Topaz	W—D	bezbarwna i jasnoniebieska
Turmalin	S	ciemnoniebieska i jasnoniebieska
Cyrkon	S	umiarkowanie niebieska i bezbarwna do szarej
Zoizyt	S	niebieska, purpurowa i zielonożółta
<i>Obiekty zielone</i>		
Andaluzyt	S	brunatnozielona i ciemnoczerwona
Beryl (szmaragd)	S	zielona i niebieskozielona
Chryzoberyl (aleksandryt)	S	ciemnoczerwona, pomarańczowa i zielona (trichroizm)
Korund (szafir)	S	zielona i żółtozielona
Oliwin	W	żółtozielona i zielona
Topaz	D	niebieskozielona i jasnozielona
Tytanit	D	brunatnozielona i niebieskozielona
Turmalin	S	niebieskozielona do ciemnobrunatnozielonej i żółto-zielona
Cyrkon	W—D	brunatnozielona i zielona

Material	Stopień pleochroizmu (wg tab. 19)	Barwa pleochroiczna
<i>Obiekty żółte</i>		
Beryl	W	jasnozielonożółta i jasnoniebieskozielona
Chryzoberyl	D	bezbarwna, bardzo jasnożółta i zielonożółta (trichroizm)
Korund	W	żółta i jasnożółta
Danburyt	W	bardzo jasnożółta i jasnożółta
Kwarc (cytryn)	VW	jasnożółta i bardzo jasnożółta
Spodumen	D	jasnożółta i bardzo jasnożółta
Topaz	D	brunatnożółta, żółta i pomarańczowożółta (trichroizm)
Turmalin	D	jasnożółta i ciemnożółta
Cyrkon	W	żółtobrunatna i żółta
<i>Obiekty brunatne i pomarańczowe</i>		
Korund	S	żółtobrunatna do pomarańczowej i bezbarwna
Kwarc	W	brunatna i czerwobrunatna
Topaz	D	żółtobrunatna i brunatna
Turmalin	S	żółtobrunatna i ciemnozielonobrunatna
Cyrkon	W—D	brunatnożółta i purpuwobrunatna
<i>Obiekty różowe i czerwone</i>		
Andaluzyt	S	ciemnoczerwona i brunatnozielona
Beryl (morganit)	D	jasnoczerwona i czerwopurpurowa
Chryzoberyl (aleksandryt)	S	ciemnoczerwona, pomarańczowa i zielona (trichroizm)
Korund (rubin)	S	purpurowoczerwona i pomarańczowoczerwona
Kwarc (różowy)	S	brunatnoczerwona do jasnoróżowej
Syntetyczny korund	S	purpurowoczerwona i pomarańczowoczerwona
Spodumen (kunzyt)	S	jasnoczerwona do purpurowej i bezbarwna
Topaz	D—S	ciemnoczerwona i jasnoczerwona
Cyrkon	D	czerwopurpurowa i czerwobrunatna

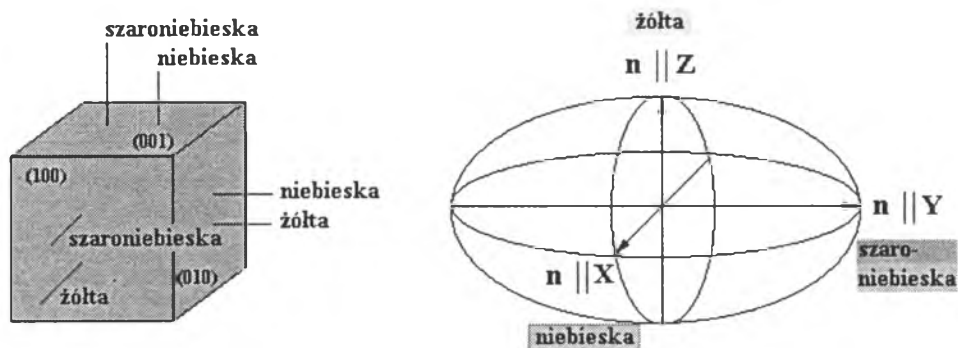


Rys. 139. Pleochroizm kryształów jednoosiowych optycznie na przykładzie berylu (szmaragdu) (wg Łapota, 1995)

Barwa: z — zielona, n — niebieska; współczynnik refrakcji: n_w — promienia zwyczajnego, n_e — promienia nadzwyczajnego

graficznej Z, to nie wykazuje on pleochroizmu (kierunek izotropii absorpcji). Pleochroizm kryształów jednoosiowych optycznie jest określany często mianem **dichroizmu** z uwagi na występowanie jedynie dwu barw pleochroicznych w kryształach o takiej symetrii.

W kryształach rombowych, jednoskośnych i trójskośnych (anizotropowych dwuosiowych optycznie) wyróżnia się trzy główne barwy pleochroiczne pokrywające się z kierunkami skrajnych wartości współczynników załamania światła w takich kryształach (rys. 140). Pleochroizm tych kryształów określany jest często mianem **trichroizmu** (tab. 20). W takich kryształach można odnaleźć dwa szczególne kierunki przemieszczania się światła, dla których zjawisko pleochroizmu nie występuje, gdyż ma miejsce izotropia absorpcji. Kierunki te położone są w kryształach symetrycznie i pokrywają się z osiami optycznymi.



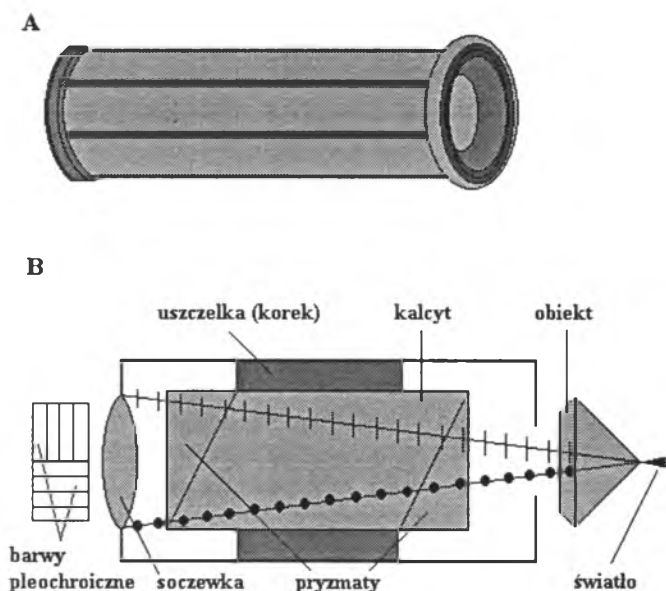
Rys. 140. Pleochroizm kryształów dwuosiowych optycznie na przykładzie kordierytu (wg Łapota, 1995)

Dowolne przekroje w kryształach anizotropowych, różne od opisanych powyżej, dostarczają barw pośrednich względem głównych barw absorpcyjnych minerału, a ich nasycenie zależy od orientacji płaszczyzny przekroju kryształu względem kierunków reprezentujących główne barwy absorpcyjne. Każdy z wzajemnie prostopadłych kierunków drgań fal świetlnych przenikających przez kryształ anizotropowy naprowadzany kolejno na płaszczyznę drgań światła spolaryzowanego dostarcza właściwej mu barwy pleochroicznej wynikającej z orientacji tego przekroju względem głównych kierunków optycznych kryształu. Rotując kryształ o 360° , natrafia się czterokrotnie, co 90° , na zmianę barw pleochroicznych, przy czym co 180° występuje powtórzenie się tej samej barwy pleochroicznej. Największej różnicy barw pleochroicznych należy się spodziewać po rotacji o 90° .

Szczególnym zjawiskiem pleochroicznym są obserwowane w niektórych kryształach tzw. pola pleochroizmu wokół pewnych inkluzji. Dotyczy to zwłaszcza wrostków minerałów zawierających pierwiastki radioaktywne. Takie pola pleochroiczne powstają w wyniku destrukcji struktury krystalicznej promieniowaniem α , rzadziej β , wywołującym się wskutek samorzutnego rozpadu pierwiastków promieniotwórczych zawartych we wrostkach.

3.4.5.1. Dychroskop

Badanie dychroskopowe polega na obserwacji barw pleochroicznych obiektu gemmologicznego oświetlonego światłem dziennym. Do obserwacji barw pleochroicznych służy przyrząd zwany dychroskopem lub lupą Haidingera. Zasadę działania tego przyrządu przedstawia rys. 141. Głównym elementem dychro-



Rys. 141. Dychroskop kalcytowy (wg Maślankiewicza, 1982)

A — wygląd zewnętrzny,
B — schemat

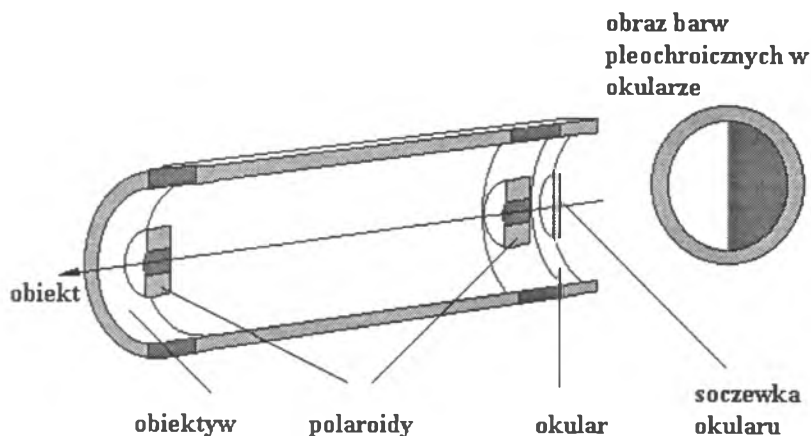
skopu jest wydłużony romboedr przezroczystego kryształu kalcytu umieszczony w metalowej tubie zaopatrzonej na jednym końcu w kwadratowy, a na drugim, zwróconym ku oku obserwatora, okrągły otwór z wbudowaną soczewką powiększającą. Wielkość kwadratowego otworu i kryształu kalcytu są tak dobrane, że w wyniku podwójnego załamania i jednoczesnej polaryzacji światła przechodzącego przez kalcyt powstają dwa obrazy otworu, które są położone obok siebie i rozświetlone odmiennie spolaryzowanym światłem. Drgania światła w każdym obrazie kwadratowego otworu zachodzą w płaszczyznach wzajemnie prostopadłych. Kalcyt odpowiedzialny za taką reakcję optyczną jest kryształem optycznie jednoosiowym, ujemnym, krystalizującym w układzie trygonalnym. Jeśli przed kwadratowym otworem umieści się przezroczysty kryształ wykazujący pleochroizm, to przez obrót kryształem lub dychroskopem można znaleźć takie ich wzajemne położenie, w którym najmocniej zaznaczy się różnica zabarwienia sąsiadujących pól obrazu otworu kwadratowego widzianego w wizjerze dychroskopu. Różnice barwy są największe wówczas, gdy kierunki drgań światła w kalcycie zlewają się z kierunkami drgań światła w badanym kryształ. Zjawisko to można obserwować we wszystkich kierunkach kryształu, w których zachodzi podwójne załamanie światła. W kierunku osi optycznej oba pola otworu kwadratowego wykazują to samo zabarwienie, gdyż w tym kierunku w kryształach anizotropowych nie występuje podwójne załamanie światła. Pleochroizmu nie wykazują także wszystkie obiekty izotropowe optycznie oraz część obiektów anizotropowych.

Za pomocą dychroskopu ustala się stopień pleochroizmu (silny, wyraźny, słaby, brak) oraz barwy pleochroiczne właściwe określonym obiektom anizotropowym.

Dychroskopem pracującym z wykorzystaniem kryształu przezroczystego kalcytu (szpatu) jest dychroskop Amerykańskiego Instytutu Gemmologicznego (rys. 141a). Maksymalną efektywność badania tym dychroskopem zapewnia zastosowanie pomocniczego, światłowodowego oświetlenia badanego obiektu.

W ofercie handlowej znajdują się także dychroskopy pracujące z wykorzystaniem tzw. filtrów dychroskopowych (np. filtr Hannemanna). Jest to element optyczny zestawiany z dwu dopasowanych do siebie połówek polaroidu zorientowanych wzajemnie prostopadle płaszczyznami polaryzacji światła (rys. 142). Dychroskop taki składa się z oprawy metalowej zaopatrzonej na jednym końcu w otworek kwadratowy, a na drugim, zwróconym do oka obserwatora, w otworek kołowy wyposażony w filtr dychroskopowy. Ponieważ w anizotropowym obiekcie następuje podwójne załamanie światła i jednoczesna polaryzacja każdego z powstałych promieni, filtr dychroskopowy pochłania tę część promieni światła spolaryzowanego wychodzącego z obiektu, która w każdej z połówek filtru nie jest równoległa do ich płaszczyzny polaryzacji. W rezultacie, jeśli obiekt wykazuje zjawisko pleochroizmu, to ujawni się ono przez różnicę barwy lub odcieni barwy połówek filtru dychroskopowego.

Obiekty gemmologiczne wykazujące silny pleochroizm mogą być obser-
162 wowane za pomocą pojedynczego polaroidu. Przez obrót polaroidu, którym



Rys. 142. Dychroskop, przekrój polaroidowy (wg Reada, 1991)

oglądany jest badany obiekt, można obserwować raz jeden, a raz drugi promień spolaryzowany wychodzący z obiektu. Każdy z tych promieni ma inną barwę pleochroiczną. Ten sam efekt osiąga się przez obrót obiektem.

3.4.6. Luminescencja

Jarzenie, zimne świecenie lub promieniowanie, którego energia powstaje kosztem innych rodzajów energii niż energia cieplna, określa się mianem luminescencji. Promieniowanie luminescencyjne powstaje w związku z przejściami atomów lub cząstek tworzących jarzące ciało ze stanu wzbudzonego do stanu podstawowego. Energii potrzebnej do wywołania luminescencji dostarcza działanie różnych czynników, np. napromieniowanie, reakcja chemiczna, proces krystalizacji. Zjawisko to zauważono już w XVI stuleciu. Zwrócono wówczas uwagę na świecenie w ciemności niektórych minerałów, np. diamentu, rubinu, jeśli zostały uprzednio naświetlone światłem dziennym.

Luminescencję wykazują gazy, roztwory wielu substancji organicznych oraz pewne ciała stałe. Substancje te są nazywane luminoforami. Widmo luminescencyjne gazów pod niedużym ciśnieniem jest widmem nieciągłym (składającym się z większej lub mniejszej liczby linii), a ciała stałych i cieczy — widmem pasmowym.

Energii wzbudzenia dla wywołania luminescencji może dostarczyć:

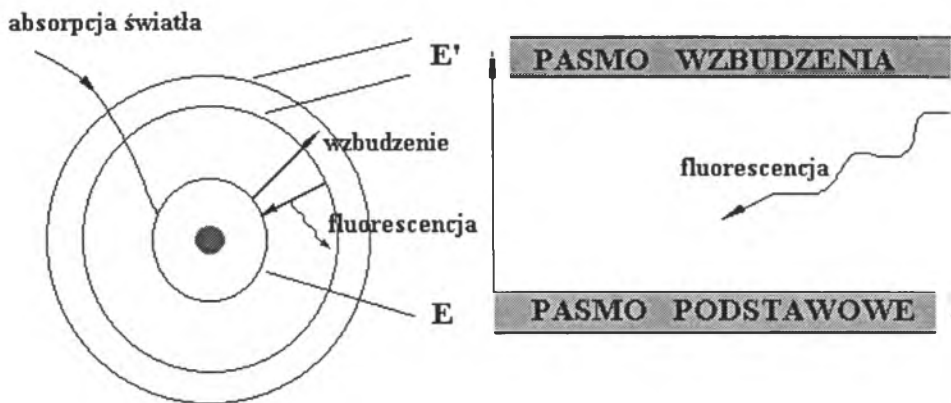
- promieniowanie świetlne, zarówno widzialne jak i nadfioletowe; fotoluminescencja,
- promieniowanie katodowe, czyli wiązka przyspieszonych elektronów; katodoluminescencja,
- promieniowanie rentgenowskie; rentgenoluminescencja,
- promieniowanie jonizujące, np. promieniowanie α , β , γ , promieniowanie kosmiczne; radioluminescencja,

- reakcje chemiczne; chemoluminescencja,
- reakcje biochemiczne; bioluminescencja,
- rozcieranie, rozdrabnianie, kruszenie; triboluminescencja,
- energia pola elektrycznego; elektroluminescencja,
- krystalizacja substancji; krystaloluminescencja.

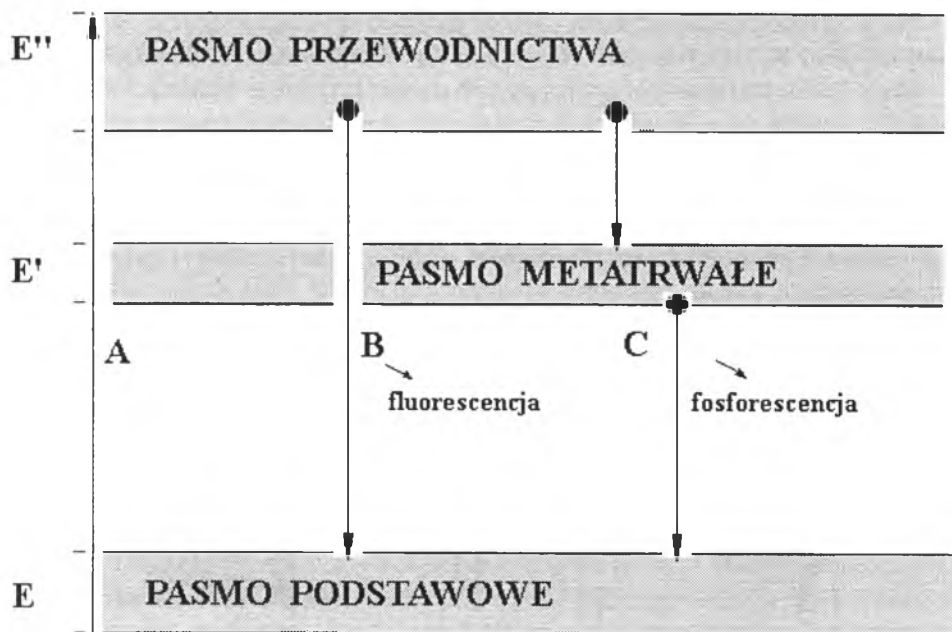
W świecie kryształów największe znaczenie ma fotoluminescencja. W zależności od szybkości gaśnięcia świecenia po przerwaniu wzbudzenia, a ściślej w zależności od procesów zachodzących między absorpcją a emisją światła, dzieli się ją na fluorescencję i fosforescencję.

Fluorescencja, której nazwa wywodzi się od fluorytu, w którym to zjawisko najwcześniej zauważono, trwa tyle czasu, ile trwa wzbudzenie. Jest to świecenie krótkotrwałe (czas trwania ok. 10^{-8} s od momentu wzbudzenia) występujące przy samorzutnym przejściu elektronu z wyższego poziomu energetycznego atomu lub cząsteczki na niższy poziom energetyczny (rys. 143).

Fosforescencja to świecenie, które utrzymuje się jeszcze przez pewien czas po zaprzestaniu wzbudzenia, a emisja światła fosforescencji następuje dopiero po pewnym czasie po pochłonięciu światła pobudzającego. Można zatem powiedzieć, że różni się od fluorescencji swą bezwładnością. Jest to świecenie mogące trwać w niektórych substancjach przez wiele godzin i dni, powstające z udziałem energii cieplnej ośrodka. Znane są jednak także fosforescencje bardzo krótkotrwałe, jednak wyraźnie dłuższe od czasu trwania fluorescencji. Mechanizm fosforescencji jest inny niż fluorescencji, gdyż nie jest to zjawisko wewnątrzdrobinowe, lecz międzydrobinowe, a w grę wchodzi ugrupowania złożone z wielu cząsteczek. Warunkiem wystąpienia fosforescencji jest istnienie tzw. poziomów metatrwałych (rys. 144). Wzbudzeniu cząsteczki odpowiada przeniesienie elektronu do pasma przewodnictwa (przejście A). Część elektronów powraca wprost na poziom podstawowy z emisją fluorescencji (przejście B),



Rys. 143. Mechanizm fluorescencji (wg Fritscha, Rossmana, 1990—1991)
E — energia pasma podstawowego, E' — energia pasma wzbudzenia



Rys. 144. Mechanizm fosforescencji (wg Fritscha, Rossmanna, 1990—1991)

E — energia pasma podstawowego, E' — energia pasma metatrwałego, E'' — energia pasma przewodnictwa

a część przechodzi na poziom metatrwały i pozostaje tam przez pewien czas aż do chwili przeniesienia (kosztem energii cieplnej) na poziom podstawowy z emisją fosforescencji (przejście C). Fosforescencję wykazują roztwory o dużej lepkości i niektóre ciała stałe, szczególnie kryształy. Fosforescencja kryształów uwarunkowana jest istnieniem niewielkich domieszek obcych, czyli tzw. aktywatorów. Przez dodanie aktywatora do pewnych ciał krystalicznych, np. miedzi, srebra do siarczku cynku lub miedzi, bizmutu do siarczków ziem alkalicznych, otrzymuje się tzw. aktywowane fosfory krystaliczne.

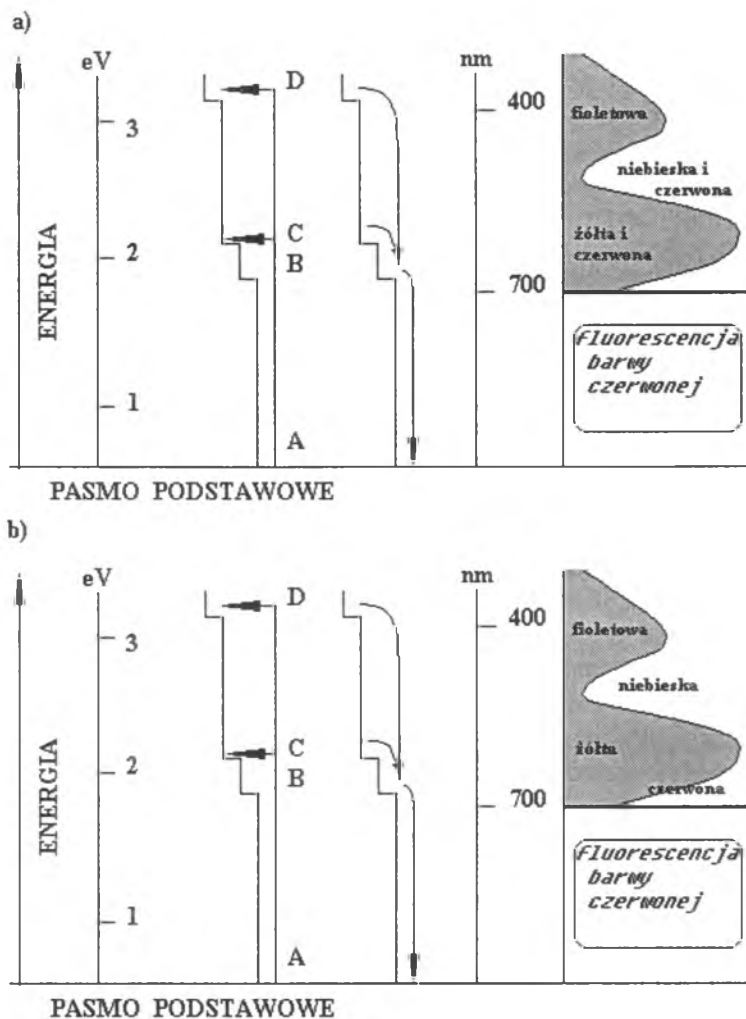
Mechanizm procesów prowadzących do luminescencji ciał nie we wszystkich przypadkach jest dostatecznie poznany. Proces wzbudzenia związany jest często z jonizacją atomów aktywatora (tzw. centrów). Emisja światła towarzyszy także rekombinacji. Widmo świecenia (barwa) zależy od rodzaju aktywatora, natomiast szybkość gaśnięcia po przerwaniu wzbudzenia zależy od defektów struktury (pułapek), często nie związanych z domieszkami, ale z termiczną obróbką aktywowanej substancji krystalicznej. Im głębsze pułapki, tym bardziej długotrwała jest fosforescencja.

Fosforescencja wyzwalana dopiero po ogrzaniu ciała nosi nazwę termofosforescencji.

Oprócz światła energii wzbudzenia mogą dostarczyć inne formy promieniowania.

W praktyce gemmologicznej największe zastosowanie ma fotoluminescencja powstająca z wykorzystaniem naświetlania promieniowaniem ultrafioletowym.

Analiza luminescencyjna polega na obserwacji i rejestracji różnych wtórnych efektów świetlnych powstających w następstwie naświetlania powierzchni. Jako zasadniczą cechę diagnostyczną wykorzystuje się zwykle barwę jarzenia. Cechą analizy luminescencyjnej jest to, że część energii wzbudzenia jest tracona w postaci ciepła. Dlatego energia kwantów światła wydzielającego się podczas



Rys. 145. Emisja, absorpcja i transmisja światła przez atomy chromu w a) szmaragdzie, b) rubinie (wg Payette, 1994)

A — elektron w stanie podstawowym, C i D — elektron w stanie wzbudzonym; powrót elektronu do pasma podstawowego poprzez poziom B wiąże się z emisją światła fluorescencyjnego o barwie czerwonej

luminescencji jest mniejsza od energii kwantów światła wzbudzającego. Innymi słowy, długość fali świecenia luminescencyjnego będzie zawsze większa niż długość fali światła wzbudzającego — z wyjątkiem niewielkiej części widma, w której pasma wzbudzenia i luminescencji zachodzą na siebie. Widmo luminescencyjne jest zawsze przesunięte w kierunku fal dłuższych w stosunku do widma absorpcji (rys. 145). Dla wielu substancji widma te są symetryczne i mają się do siebie jak lustrzane odbicia. Odległość między maksimami widma pochłaniania i widma luminescencji nazywa się przesunięciem Stokesa. Im większe jest przesunięcie Stokesa, tym łatwiej oddzielić światło wzbudzone od wzbudzającego i w ten sposób uniknąć jego wpływu („tło”) na pomiar świecenia luminescencyjnego. Luminescencję obserwuje się w kierunku prostopadłym do kierunku strumienia promieniowania wzbudzającego.

3.4.6.1. Filtry — testery fluorescencji

Najprostszym narzędziem testującym właściwości fluorescencyjne obiektów gemmologicznych są filtry. Ogólna zasada działania tego rodzaju filtrów polega na tym, że przepuszczają one światło fluorescencji wzbudzonej w testowanym obiekcie silnym źródłem światła widzialnego (250—500 W), pochłaniając jednocześnie fale elektromagnetyczne należące do pozostałych odcinków widma widzialnego.

Najbardziej znanym i rozpowszechnionym filtrem tego rodzaju jest filtr Chelsea, zwany też „filtrem szmaragdowym”. Jest on wykonany z dwu błon żelatynowych tak spreparowanych, by przepuszczały światło widzialne w ciemnoczerwonym (powyżej 690,0 nm) i żółtozielonym (570,0—630,0 nm) odcinku widma widzialnego. W rezultacie obiekty obserwowane przez filtr Chelsea mają barwę czerwoną, zielonawożółtą lub brązową. Jeśli testowany obiekt zawiera w roli chromoforu chrom, np. beryl (szmaragd) naturalny lub syntetyczny, korund (rubin) naturalny lub syntetyczny, spinel czerwony, topaz różowy, chryzoberyl (aleksandryt), to jego obecność ujawni się fluorescencją barwy czerwonej o różnym stopniu intensywności. Świecenie fluorescencyjne jest widoczne przez ten filtr dlatego, że jego krzywa absorpcji została tak ukształtowana, by zatrzymywane były wszystkie odcinki widma widzialnego z wyjątkiem odcinka odpowiadającego świeceniu fluorescencyjnemu chromu. Filtr Chelsea stosuje się głównie do wstępnej diagnostyki obiektów o barwie zielonej. Wyniki obserwacji niektórych materiałów gemmologicznych za pomocą filtru Chelsea zebrano w tab. 21. Te same możliwości testujące ma opracowany i wyprodukowany w Japonii filtr szmaragdowy (Emerald filter; Nihou Hosoki-Kizai Co. Ltd.) oraz tzw. dyskryminator rubinów (GemMaster ruby discriminator; R. Lary Kuehn Inc.).

Na podobnej zasadzie funkcjonuje także Sterek A filter (D. Walters, Wielka Brytania, 1980), wykorzystywany do testowania korundu (szafiru) i berylu (akwamarynu) celem odróżnienia ich od imitacji wykonanych z syntetycznego

Przykłady testowej barwy fluorescencyjnej (filtr Chelsea) materiałów gemmologicznych

Material	Barwa fluorescencyjna
<i>Obiekty zielone</i>	
Chryzoberyl (aleksandryt)	czerwona
Beryl (akwamaryn)	zielona (wyróżnialna)
Beryl (szmaragd)	różowa do czerwonej
Syntetyczny beryl (syntetyczny szmaragd)	silnie czerwona
Chalcedon (zawierający chrom)	czerwona
Chryzopraz	zielona
Demantoid	czerwonawa
Kwarc (awenturyń)	czerwonawa
Enstatyt	zielona
Szkło	zielona
Jadeit	zielona
Oliwin	zielona
Korund (szafir)	zielona
Syntetyczny korund (syntetyczny szafir)	czerwona
Syntetyczny korund (syntetyczny aleksandryt)	czerwona
Syntetyczny spinel	czerwona
Turmalin	zielona
Cyrkon	czerwonawa
<i>Obiekty czerwone</i>	
Granat	ciemnoczerwona
Szkło	ciemnoczerwona
Korund (rubin)	silnie czerwona
Syntetyczny korund (syntetyczny rubin)	silnie czerwona
Spinel	czerwona
Syntetyczny spinel	czerwona
<i>Obiekty niebieskie</i>	
Beryl (akwamaryn)	zielona (wyróżnialna)
Szkło (jasnoniebieskie)	zielonawa
Szkło (ciemnoniebieskie)	czerwona
Lapis-lazuli	brunatnawoczerwona

Material	Barwa fluorescencyjna
<i>Obiekty niebieskie (cd.)</i>	
Korund (szafir)	ciemnozielona
Syntetyczny korund (syntetyczny szafir)	ciemnozielonawoniebieska
Spinel	czerwona
Syntetyczny spinel ciemnoniebieski	czerwona
Syntetyczny spinel jasnoniebieski	pomarańczowa
Cyrkon	zielonawa
<i>Obiekty fioletowopurpurowe</i>	
Kwarc (ametyst)	czerwona
Korund (szafir fioletowopurpurowy)	jasnoczerwona

spinelu. Filtr ten przepuszcza promieniowanie widzialne barwy żółtozielonej do niebieskozielonej.

Należy jednak zaznaczyć, że badanie za pomocą filtrów-testerów jest jedynie badaniem pomocniczym, a do rezultatów obserwacji powinno się podchodzić krytycznie, z dużą dozą ostrożności, gdyż chromofory stosowane w materiałach syntetycznych mogą dawać podobne rezultaty jak obserwowane w materiałach naturalnych.

3.4.6.2. Lampy rtęciowe (kwarcowe, ultrafioletowe)

Niewidzialne dla oka promieniowanie elektromagnetyczne o długości fali od 400 nm do 10 nm nazywane jest nadfioletem (ultrafioletem).

W warunkach naturalnych promieniowanie to jest składową widma słonecznego, z którego do Ziemi dociera tylko ta część promieniowania, którego fale są dłuższe od 280 nm, gdyż reszta jest w znacznym stopniu pochłaniana przez atmosferę (przez powietrze).

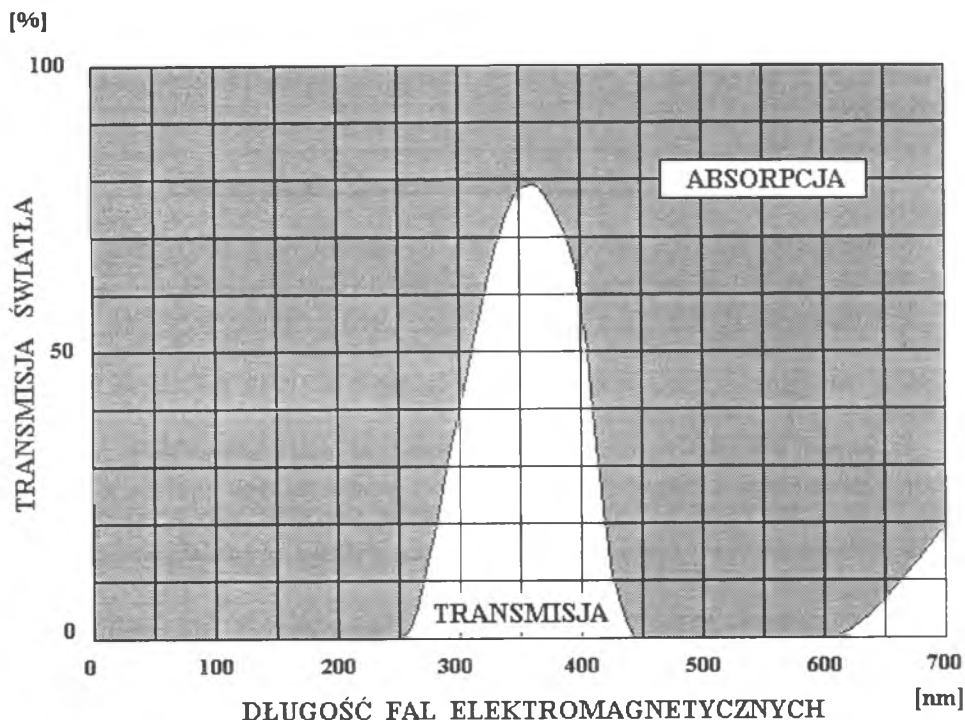
W warunkach sztucznych do wytworzenia nadfioletu używa się przeważnie lamp rtęciowych, nazywanych niekiedy także lampami kwarcowymi lub ultrafioletowymi. Jest to chyba najbogatszy pod względem ilości rozwiązań technicznych, różnorodności typów i wachlarza właściwości rodzaj źródeł promieniowania atomowego (cząsteczkowego).

Lampa rtęciowa jest zwykle lampą próżniową o kształcie rurki, ampułki lub gruszki wykonanej ze szkła kwarcowego. Szkło kwarcowe stosowane w takich lampach to szklista postać krzemionki uzyskiwana przez stopienie w temperaturze powyżej 1710°C kryształu górskiego (kwarcu) lub czystego kwarcytu. Odnacza się ono dużą odpornością chemiczną i fizyczną np. na działanie kwasów, dużych zmian temperatury w zakresie 0—1500°C, gdyż ma bardzo

mały współczynnik rozszerzalności cieplnej $\lambda = 5,4 \times 10^{-7}$ oraz znaczącą przepuszczalność dla nadfioletu, gdyż przepuszcza nadfiolet o długości fali ponad $180 \mu\text{m}$, podczas gdy zwykłe szkło tylko o długości fali ponad $340 \mu\text{m}$. Promieniowanie lampy rtęciowej jest wynikiem wzbudzenia w próżni wpływem pola elektrycznego atomów par rtęci lub rtęci i dodanych do niej atomów innych pierwiastków, np. gazów szlachetnych czy pierwiastków ziem rzadkich. Natężenie promieniowania takiej lampy zależy głównie od ciśnienia par rtęci i towarzyszących jej pierwiastków oraz od natężenia przepływającego przez lampę prądu elektrycznego. Lampy rtęciowe mają charakterystyczne widmo o przewadze bardzo krótkich fal świetlnych, głównie o długościach rzędu $253,7 \mu\text{m}$, $313,1 \mu\text{m}$ i $365,4 \mu\text{m}$.

Dla gemmologii interesujące są dwa zakresy ultrafioletu:

- zawierający fale elektromagnetyczne o długości $400\text{—}300 \mu\text{m}$, czyli tzw. bliski nadfiolet lub długofalowy nadfiolet (symbol: UVL), nazywany także popularnie „fioletowym światłem”,
- zawierający fale elektromagnetyczne o długości $300\text{—}200 \mu\text{m}$, czyli tzw. daleki nadfiolet lub krótkofalowy nadfiolet (symbol: UVC), nazywany także popularnie „czarnym światłem”.

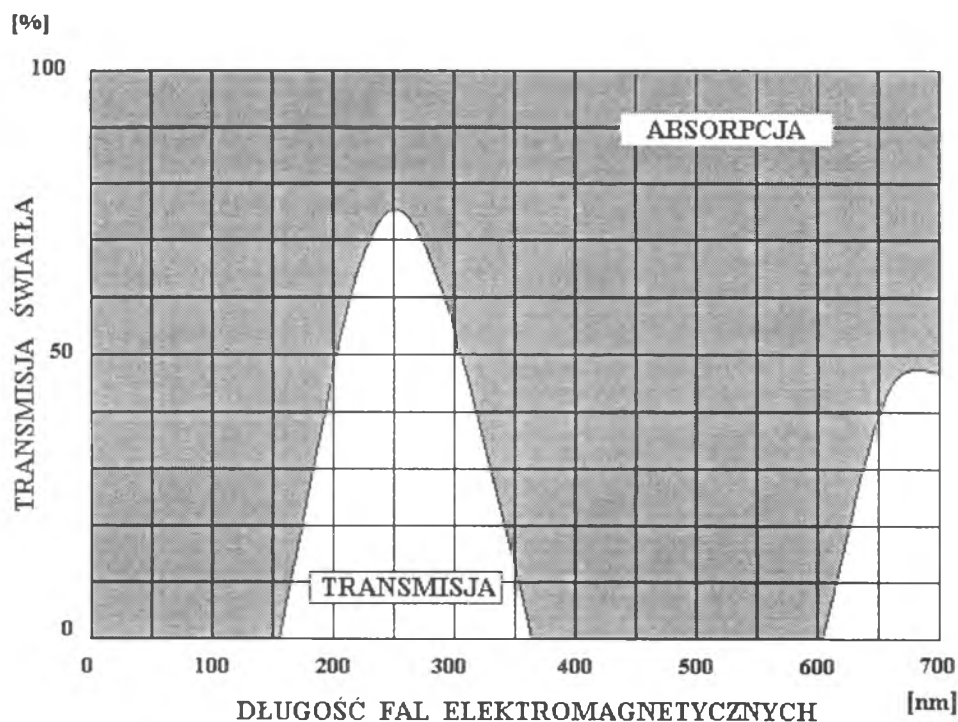


Rys. 146. Charakterystyka promieniowania wysokociśnieniowej lampy rtęciowej wyposażonej w filtr Wooda (wg Payette, 1994)

Ultrafioletowe promieniowanie długofalowe (UVL) jest wytwarzane przez wysokociśnieniowe lampy rtęciowe wyposażone w filtr Wooda. Jest to szkło zawierające kobalt i śladowe ilości niklu. Pozwala ono na przenikanie fal elektromagnetycznych o długości 300–400 μm z maksimum natężenia w okolicy 366 μm (rys. 146). Promieniowanie emitowane przez takie lampy daje wrażenie światła fioletowego, stąd stosowana niekiedy nazwa „fioletowe światło”.

Ultrafioletowe promieniowanie krótkofalowe (UVC) jest wytwarzane przez lampy rtęciowe niskociśnieniowe wyposażone w filtr Chance OX₇, który wykonano ze specjalnego szkła pozwalającego na przechodzenie fal elektromagnetycznych o długości 300–200 μm z maksimum intensywności w okolicy 254 μm (rys. 147). Promieniowanie emitowane przez taką lampę nie daje wrażenia światła, stąd stosowana niekiedy nazwa „czarne światło”.

W gemmologii oba sposoby wytwarzania fluorescencji są bardzo rozpowszechnione, gdyż ich wyniki często wzajemnie się uzupełniają. Kryształy stymulowane „fioletowym światłem” (UVL) są bardziej pospolite (tab. 22). Łatwiejsze do obserwacji i interpretacji są natomiast kryształy stymulowane „czarnym światłem” (UVC).



Rys. 147. Charakterystyka promieniowania niskociśnieniowej lampy rtęciowej wyposażonej w filtr Chance OX₇ (wg Payette, 1994)

Barwy fluorescencyjne wybranych materiałów gemmologicznych oświetlonych lampą rtęciową

Material	Fioletowe światło (UVL) [366 nm]	Czarne światło (UVC) [254 nm]
<i>Barwa fluorescencyjna biała</i>		
Diament	I—VS* (niebieskawa)	I—VS (niebieskawa)
Opal (biały)	S	S
Kość słoniowa	W—S (niebieskawa)	W—S (niebieskawa)
Bursztyn	M—VS (niebieskawa)	M—S (żółtawozielona)
Koral (biały)	W—S (niebieskawa)	W—S (niebieskawa)
Plastik (niektóre)	S	W—S
Szykret	I—S (niebieskawa)	I—S (niebieskawa)
Syntetyczny spinel	I	S (niebieskawa lub zielonkawa)
Szkło	I—S	I—S
Perła	I—S (niebieskawy)	I—M (niebieskawy)
Perła hodowana	I—S (niebieskawy)	I—S (niebieskawy)
<i>Barwa fluorescencyjna żółta</i>		
Bursztyn	W—S	W—M
Apatyt (zielony)	M (ciemnozielonkawa)	W
Apatyt (fioletowy)	M (zielonawa)	W—M (fioletowa)
Diament	I—S	I—S
Opal (biały)	M—S (możliwa fosforescencja)	M—S

Material	Fioletowe światło (UVL) [366 nm]	Czarne światło (UVC) [254 nm]
<i>Barwa fluorescencyjna żółta (cd.)</i>		
Szkło	I—S	I—S
Syntetyczny spinel	S	I—M
YAG (żółtawozielony)	VS	VS
Cyrkon	I—M (pomarańczowa)	I—M (pomarańczowa)
Cyrykon	I—M	I—M
Topaz	I—W	I
Syntetyczny korund (syntetyczny szafir)	I	M—S (zielonawa)
<i>Barwa fluorescencyjna niebieska</i>		
Diament	I—S	I—S
Kość słoniowa	W—S	W—S
Perła	M—S	M—S
Perła hodowana	M—S	M—S
Syntetyczny spinel	I lub S	S
Fluoryt	I—VS (fosforescencja)	I—S
Szkło	I—S	I—S
Benitoit	I	S
Plastik	I—S	I—S
Syntetyczny korund (syntetyczny szafir)	I	W—M

Material	Fioletowe światło (UVL) [366 nm]	Czarne światło (UVC) [254 nm]
<i>Barwa fluorescencyjna czerwona</i>		
Syntetyczny korund (synt. rubin)	VS	S lub W—M
Korund (rubin)	S, W lub M—S	W, I lub W—S
Spinel	W—S	I—W
Syntetyczny spinel	S	S
Szkło	I	I—S
Diamant	I—S	I—M
Skaleń	I	M
Grossular	I—M	I—M
<i>Barwa fluorescencyjna pomarańczowa</i>		
Koral (pomarańczowy do jasnoczerwonego)	I—M (do różowa- wego)	I—M (do różowa- wego)
Korund (szafir blado- niebieski)	M—S (różowawy)	W—M
Korund (szafir bezbarny)	I—S (czerwona- wy)	I—M
Diamant	I—S	I—S
Jadeit	I—W—M	I—W
Syntetyczny spinel (jasnoniebieski)	W—M	M—S
YAG (bezbarny)	I—M	I—W
Cyrkon (pomarańczowo- czerwony)	I	I—S (do żółtej)

Material	Fioletowe światło (UVL) [366 nm]	Czarne światło (UVC) [254 nm]
<i>Barwa fluorescencyjna pomarańczowa (cd.)</i>		
Syntetyczny szmaragd	M	M
Syntetyczny korund (synt. szafir – aleksandryt)	M	M
<i>Barwa fluorescencyjna zielona</i>		
Bursztyn	S (biaława)	W—S (żółtawa)
Apatyt	M (żółtawa)	W (żółtawa)
Opal	I—S	I—S
Perła	I—S	I—S
Perła hodowana	I—S	I—S
Syntetyczny spinel	S	S
Diamant	I—S	I—S
Szkło	I—S	I—S
Beryl (szmaragd)	I—W	I—W
<i>Barwa fluorescencyjna fioletowa</i>		
Diamant	I—S	I—S
Fluoryt	I—S (niebieskawa)	I—S (niebieskawa)
Apatyt (żółty i fio- letowy)	I—M (różowawy lub żółtawy)	I—M (różowawy lub żółtawy)
Syntetyczny szafir	M—S (czerwonawy)	W—M
Beryl (morganit)	I—W (czerwonawa)	I—W (czerwonawa)

* Fluorescencja: I — inertny, W — słaba, M — umiarkowana, S — mocna, VS — bardzo mocna.

Ponieważ promieniowanie ultrafioletowe jest szkodliwe dla organizmów żywych, podczas wykonywania takich badań należy pamiętać o zachowaniu należytej ostrożności i chronić się przed działaniem ultrafioletu, szczególnie oczy i skórę rąk. W tym celu stosuje się różne osłony. Komfort i bezpieczeństwo prowadzenia tego rodzaju obserwacji zapewnia przystosowana do takiego celu komora obserwacyjna.

Znajdujące się w ofercie handlowej lampy rtęciowe można podzielić na kieszonkowe i stacjonarne. Lampy kieszonkowe mają autonomiczne zasilanie i przeznaczone są głównie do badań z wykorzystaniem „fioletowego światła”. Lampy stacjonarne mają zwykle możliwość wytworzenia ultrafioletu w obu zakresach, tj. UVL i UVC (tzw. kompakty).

Badanie za pomocą lampy rtęciowej (kvarcowej, ultrafioletowej) polega na oświetleniu obiektu z odległości około 20 cm podczas około 20 s i obserwacji emisji światła z jego powierzchni. Podstawowe badanie fluorescencji obiektu gemmologicznego zmierza zwykle do określenia jego barwy fluorescencyjnej (tab. 22). W niektórych pracowniach gemmologicznych podczas takich badań wykorzystuje się także wzorce barwy fluorescencyjnej (tab. 23). Warto podkreślić, że pewne materiały gemmologiczne mogą wykazywać podobną barwę fluorescencyjną w UVL, jak i w UVC. Jednak wiele materiałów gemmologicznych jest w ultrafiolecie inertnych, tzn. nie wykazuje w takim oświetleniu fluorescencji.

Tabela 23

Wzorcowe barwy fluorescencji (tzw. wzorce fluorescencji)

Wzorec [ok. 3 × 4 cm]	Czarne światło (UVC) [254 nm]	Fioletowe światło (UVL) [366 nm]
U1 – Aragonit	żółta	żółta
U3 – Benitoit	intensywnie niebieska	bladoróżowa
U4 – Krystobalit	jasnozielona	jasnozielona
U5 – Fluoryt	intensywnie niebieska	niebieska
U7 – Scheelit	intensywnie jasnoniebieska	—
U8 – Tremolit	—	jasnopomarańczoworóżowa
U9 – Willemmit	zielona (świecąca)	szara
U10 – Hackmanit	różowa	pomarańczowożółta
U11 – Skapolit	żółta	żółta

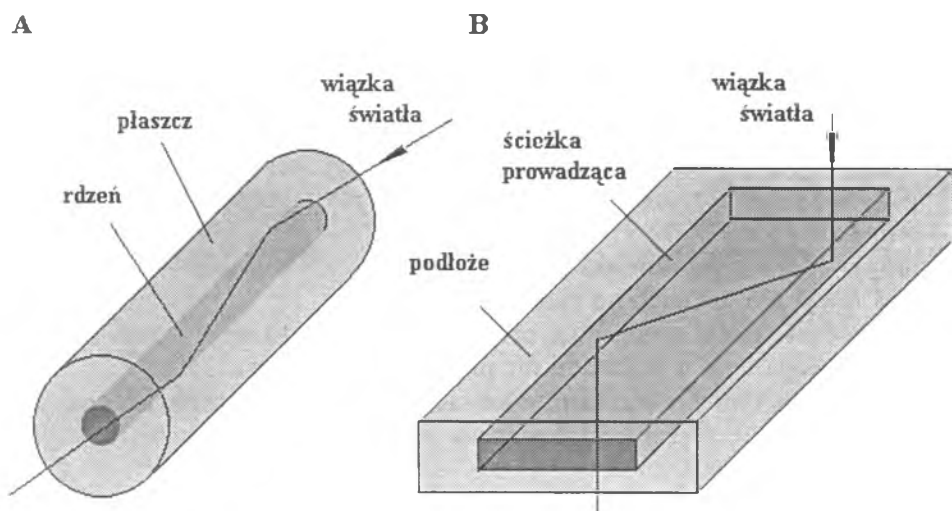
3.4.7. Przewodzenie światła

Jeśli światło, wędrując od strony środowiska optycznie gęstszego, zderzy się z granicą środowiska optycznie rzadszego pod kątem większym od granicznego, to ulegnie całkowitemu wewnętrznemu odbiciu. Jeśli przy kolejnych zderzeniach

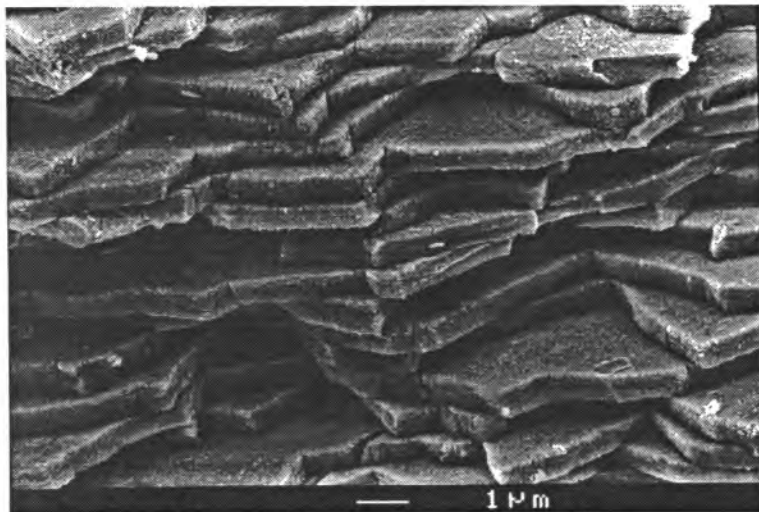
z tą granicą każdorazowo kąt padania będzie większy od granicznego, to światło nie będzie mogło wydostać się ze środowiska optycznie gęstszego. Tym samym światło będzie przesyłane przez to środowisko na pewną odległość zależną od geometrii i rozległości tego środowiska. Najprostszą ilustracją tego zjawiska jest tzw. świetlista struga wodna.

Praktycznym zastosowaniem zjawiska całkowitego wewnętrznego odbicia fali elektromagnetycznej jest światłowód, czyli kanał optyczny do przewodzenia w przestrzeni fali świetlnej. W tej roli wykorzystywane są szklane lub plastikowe włókna składające się z rdzenia i otaczającego go płaszczu, który jest wykonany z materiału optycznie rzadszego w porównaniu z materiałem rdzenia. Mogą to być również szklane rurki metalizowane wewnętrznie. Spotyka się też światłowody płaskie, warstwowe (rys. 148). Światłowody wykorzystuje się przeważnie do przesyłania światła monochromatycznego.

Właściwości specyficznego przewodzenia światła mają także niektóre obiekty gemmologiczne. Możliwość wędrówki światła zależy w nich głównie od struktury wewnętrznej. Zjawisko to jest wykorzystywane celem odróżnienia pereł naturalnych od hodowanych. Perły naturalne i hodowane zbudowane są ze sferycznych warstewek aragonitu przedzielonych konchioliną (rys. 149). Istotną różnicą między nimi polega na ich budowie wewnętrznej. W perle naturalnej wszystkie warstewki wokół zarodka układają się koncentrycznie. W perle hodowanej sztuczne jądro jest duże i składa się z równoległych warstewek aragonitu przedzielonych konchioliną. Tylko najbardziej zewnętrzna część takiej perły (tzw. cortex) składa się z koncentrycznych warstewek aragonitu identycznych z perłami naturalnymi. Każda z tych części odmiennie przewodzi światło monochromatyczne.



Rys. 148. Światłowód
A — włóknisty, B — warstwowy



Rys. 149. Struktura wewnętrzna perły (zdjęcie z mikroskopu elektronowego; wykonane w Instytucie Materiałów w Nantes, Francja)

3.4.7.1. Perłoskop® (neoendoskop)

Jest to przyrząd do badania pereł naturalnych i hodowanych skonstruowany przez H. Atalaya z Laboratorium Gemmologicznego w Nantes (Francja). W budowie tego przyrządu wykorzystano tę samą zasadę, która przyświecała w 1926 roku A. Perrinowi i G. Chilowsky'emu przy konstrukcji tzw. endoskopu. Polega ona na umieszczeniu perły w wąskiej strudze silnego światła monochromatycznego i na obserwacji uzyskiwanych efektów optycznych.

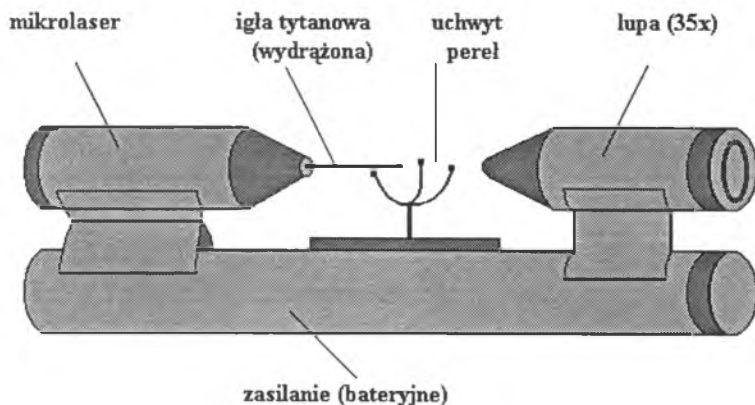
Perłoskop jest urządzeniem autonomicznym, zasilanym bateryjnie. Składa się z:

- mikrolaserowego źródła światła,
- tytanowej igły o średnicy 0,3 mm wydrążonej wewnątrz i zakończonej platynowym pryzmatem o kącie łamiącym 45° , którego zadaniem jest odbijanie światła,
- lupy o 35-krotnym powiększeniu,
- podstawki lub uchwytu na badany obiekt.

Całkowite wymiary przyrządu są niewielkie i wynoszą: 12 cm × 4,5 cm × 3 cm. Całkowita waga wraz z bateriami nie przekracza 200 g (rys. 150).

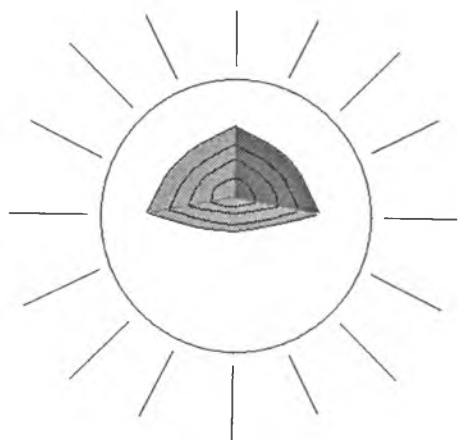
Przyrządem tym można identyfikować pereł zarówno przewiercone, jak i nie przewiercone, także wmontowane w różne obiekty, np. kolie, kolczyki, pierścionki, bransolety.

Jeśli perła nie jest przewiercona lub jeśli jest wmontowana w obiekt, to bada się ją w ten sposób, że promień monochromatycznego światła laserowego skierowuje się na perłę od strony jej powierzchni bez korzystania z pośrednictwa

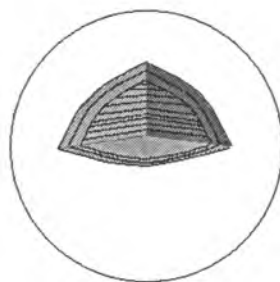


Rys. 150. Perloskop® (wg Atalaya, 1994)

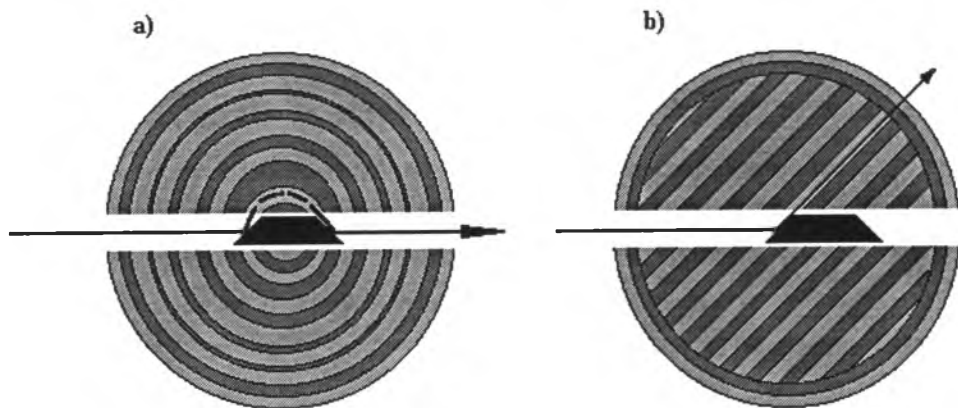
tytanowej igły. Badana perła spoczywa wtedy na specjalnej podstawie, którą nakłada się na wylot strumienia światła laserowego. Koncentryczne warstewki aragonitu perły naturalnej przeciwstawiają się penetracji światła laserowego i powodują jego znaczące powierzchniowe rozproszenie (rys. 151). Wokół takiej perły tworzy się charakterystyczna aureola świetlna (tzw. rozproszenie zewnętrzne). Natomiast równoległe warstewki aragonitu perły hodowanej ułatwiają penetrację światłem jej wnętrza (rys. 152). Następuje tzw. rozproszenie wewnętrzne. Perły hodowane nie mające dużego sztucznego jądra ujawniają w takiej sytuacji tzw. robakowatą plamę.



Rys. 151. Reakcja optyczna perły naturalnej oświetlonej bezpośrednio światłem mikrolasera (wg Atalaya, 1994)



Rys. 152. Reakcja optyczna perły hodowanej oświetlonej bezpośrednio światłem mikrolasera (wg Atalaya, 1994)



Rys. 153. Bieg światła w przewierconej perle naturalnej (a) i hodowanej (b) oświetlonej światłem mikrolasera za pośrednictwem wydrążonej igły tytanowej zakończonej platynowym pryzmatem o kącie łamiącym 45° (wg A t a l a y a, 1994)

Jeśli perła jest przewiercona, to można ją nałożyć na wydrążoną wewnątrz igłę tytanową zakończoną platynowym pryzmatem. Koncentryczne warstewki aragonitu perły naturalnej umożliwiają przewodzenie światła laserowego odbitego od czołowej powierzchni łamiącej pryzmatu platynowego i po ponownym jego odbiciu od tylnej powierzchni pryzmatu przesłanie go do oka obserwatora. Obserwacje wykonuje się lupą o dużym powiększeniu (rys. 153a). Równoległe przebiegające warstewki aragonitu jądra perły hodowanej ze względu na ich geometrię dokonują transmisji światła tylko w kierunku powierzchni perły często z efektem „kociego oka” (rys. 153b). Przy uważnej manipulacji i obserwacji towarzyszących temu efektów optycznych można tym sposobem ustalić także wielkość sztucznego jądra w perłach hodowanych.

3.5. Inne własności materiałów gemmologicznych

Wyprodukowanie w obecnym stuleciu licznych materiałów syntetycznych, których własności optyczne są często bardzo bliskie naturalnym, zmusiło gemmologów do sięgnięcia po dodatkowe własności celem wsparcia powszechnie używanych procedur identyfikacyjnych. W wyniku tego opracowano wiele nowych, relatywnie tanich i łatwo dostępnych, przyrządów o cechach testerów, wykorzystujących inne niż tradycyjne, nie uwzględniane dotychczas, własności fizyczne materiałów gemmologicznych. Testery umożliwiają wykonanie szybkiej i pewnej identyfikacji nawet bardzo małych obiektów gemmologicznych, np. o wielkości około 0,01 karata, często głęboko osadzonych w oprawie, bez potrzeby uciekania się do ich demontażu, a których nie można było dotychczas szybko i pewnie identyfikować powszechnie używanymi przyrządami pracującymi według tradycyjnie uwzględnianych własności fizycznych, przeważnie optycz-

3.5.1. Przewodnictwo cieplne

Przemieszczanie się energii cieplnej w obiekcie z miejsc o wyższej temperaturze do miejsc o niższej temperaturze nazywa się przewodnictwem cieplnym. Parametrem charakteryzującym przewodnictwo cieplne poszczególnych materiałów jest współczynnik przewodnictwa cieplnego. Określa on ilość ciepła, która w czasie 1 s przepływa przez przekrój 1 cm^2 przy gradiencie temperatury 1°C na odcinku o długości 1 cm.

Dla większości kryształów przewodnictwo cieplne jest własnością kierunkową. Tylko kryształy z układu regularnego są pod tym względem izotropowe. W kryształach trygonalnych, tetragonalnych i heksagonalnych anizotropię

Tabela 24

Przewodnictwo cieplne wybranych materiałów gemmologicznych

Materiał gemmologiczny	Przewodnictwo cieplne [cal/cm °C]
Diament	1,6—4,8
Korund	0,060—0,083
Topaz	0,027—0,046
Dysten	0,033—0,041
Spinel	0,022—0,028
Fluoryt	0,022—0,023
Sylimanit	0,022
Andaluzyt	0,018
Jadeit	0,014
Rutyl	0,012—0,023
Grossular	0,013
Kwarc	0,014—0,026
Spodumen	0,013
Diopsyd	0,009—0,013
Oliwin	0,011
Turmalin (elbait)	0,012
Cyrkon	0,010
Almandyn	0,008
Staurolit	0,008
Pirop	0,007
Beryl	0,009—0,013
Zoizyt	0,005
Labradoryt	0,003
Szkło	0,001—0,003

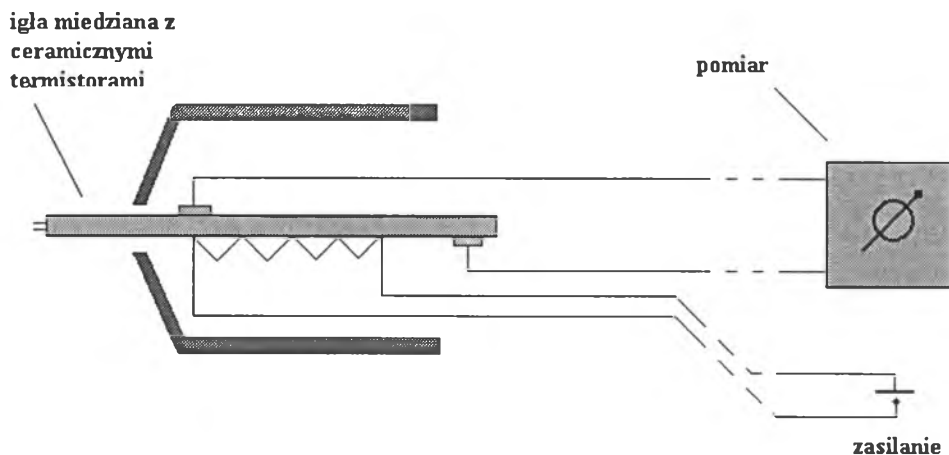
współczynnika przewodnictwa cieplnego obrazuje elipsoida obrotowa. W kryształach rombowych, jednoskośnych i trójskośnych obrazem zmienności współczynnika przewodnictwa cieplnego jest elipsoida trójosiowa.

Przewodnictwo cieplne kryształów uwarunkowane jest głównie rodzajem wiązań chemicznych występujących w kryształach. Współczynnik przewodnictwa cieplnego jest zwykle największy w kierunku występowania najsilniejszych wiązań w kryształach (tab. 24). Przewodnictwo cieplne w kryształach niemetalicznych odbywa się zasadniczo za pomocą procesu falowego. W kryształach metali nośnikami ciepła są elektrony walencyjne.

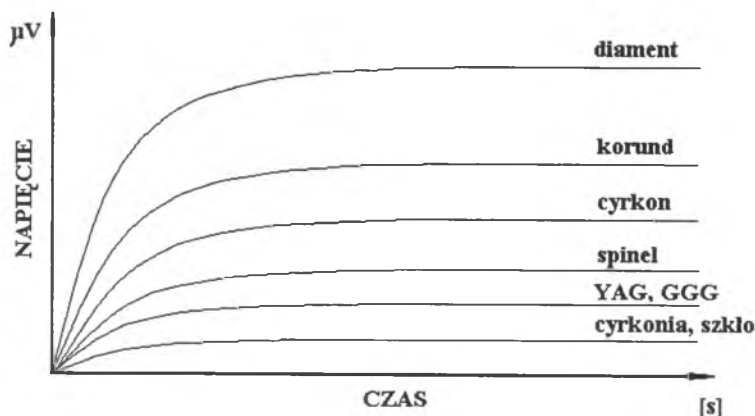
3.5.1.1. Testery przewodnictwa cieplnego (termolizery)

Współcześnie dostępnych jest wiele testerów, których funkcjonowanie opiera się na wykorzystaniu właściwości przewodnictwa cieplnego identyfikowanego materiału. Testery, których działanie opiera się na wykorzystaniu właściwości przewodnictwa cieplnego, nazywane są mikrokonduktymetrami cieplnymi (termolizerami). Większość z nich została skonstruowana z myślą o diamencie.

Jednym z pierwszych przyrządów tego rodzaju był tester znany pod handlową nazwą The Ceres Diamond Probe. Wykorzystywano go przede wszystkim do szybkiego i skutecznego odróżniania cyrkonii od diamentu. Jego nowocześniejszą wersją jest The Ceres Diamond Probe II. Przyrząd ten jest wyposażony w piórowy czujnik zaopatrzony w ceramiczne termistory, których zadaniem jest przekazywanie i odbieranie niewielkich porcji ciepła (rys. 154). Badany obiekt, w zależności od własności przewodnictwa cieplnego, może wolniej lub szybciej odprowadzać ciepło z końcówki termistora ogrzewającego. Końcówka termistora ogrzewającego ma temperaturę $\sim 65^{\circ}\text{C}$. W rezultacie



końcówka termistora odbierającego impulsy ciepłne będzie wykazywała, zależnie od przewodnictwa cieplnego obiektu, większy lub mniejszy przyrost temperatury względem otoczenia. Ta różnica temperatur pociąga za sobą przepływ elektronów w testowanym materiale, a zatem przepływ prądu elektrycznego. Wielkość przepływu jest wartością mierzoną (rys. 155). Pomiar jest powtarzany



Rys. 155. Napięcie prądu przepływającego przez różne materiały gemmologiczne pomiędzy termistorami mikrokonduktymetru cieplnego

wielokrotnie w krótkich odstępach czasu. Dzięki elektronicznym obwodom scalonym uzyskiwany wynik uśredniony rejestrowany jest na skali, na której różne naśladownictwa diamentu dają odczyty w różnych miejscach skali. Poprawna praca przyrządu wymaga stałej temperatury otoczenia mieszczącej się w przedziale 12—32°C (obiekty o temperaturze niższej lub wyższej wymagają kilkuminutowego przystosowania i wyrównania temperaturowego). Ponadto zaleca się badanie obiektu od strony korony i podstawy, gdyż niektóre z nich mogą być dubletem lub nawet trypletem. Należy również unikać przypadkowego kontaktu końcówki czujnika z oprawą obiektu, gdyż przewodnictwo metali używanych do oprawy, szczególnie wysokiej próby, może dać mylący odczyt, ponieważ ich przewodnictwo cieplne jest wysokie. Nowsze konstrukcje mają wbudowany alarm dźwiękowy sygnalizujący zetknięcie końcówki czujnika z oprawą obiektu.

Na podobnej zasadzie działa wiele innych przyrządów tego rodzaju. Jednym z bardziej znanych jest Presidium Gem Tester występujący na rynku także pod nazwą Gem Diamond Master. Przyrząd ten jest zaopatrzony w autotest zapewniający poprawną ocenę badanego obiektu. Może być wyposażony w autonomiczne zasilanie, np. bateryjne. Jedna z jego wersji oferowana pod nazwą Presidium Duotester daje możliwość potwierdzenia identyfikacji opartej na przewodnictwie cieplnym identyfikacją opartą na pomiarze refleksyjności. Przyrząd ten jest wyposażony w siedem wzorców najczęściej spotykanych 181

naśladownictw diamentu. Wzorce te wspomagają kalibrowanie i kontrolę dokładności pomiaru refleksyjności. Na wyposażeniu znajduje się także podręczna karta refleksyjności diamentu i jego naśladownictw.

Testery mają bardzo dogodną postać „pióra” (np. Diamond Mate-A). Są zasilane bateriami lub za pośrednictwem zasilacza (adaptora) z sieci energetycznej. Użycie elektronicznych obwodów scalonych pozwoliło wiele testerów zminiaturyzować, przekształcając je w przyrządy kieszonkowe. Zastosowanie ulepszonych, aktywowanych podczerwienią sensorów daje możliwość uzyskania szybkiej, stosunkowo pewnej i bezpośredniej diagnozy, uwzględniającej również możliwość popełnienia błędu, np. przez przypadkowe zetknięcie się czujnika testera z metalową oprawą testowanego obiektu. Do wyników badania takimi testerami należy jednak podchodzić ostrożnie, koniecznie potwierdzając je niezależną metodą.

Zróznicowane przewodnictwo cieplne materiałów gemmologicznych zostało wykorzystane w bardzo prosty, niekonwencjonalny sposób w tzw. metodzie „zapocenia się” obiektu. Jest to sposób nie wymagający użycia specjalnych przyrządów, polegający na porównywaniu czasu wyparowania skroplonej pary wodnej z powierzchni badanego obiektu i obiektu wzorcowego. Metoda ta bywa stosowana głównie do wstępnego oznaczenia brylantów, gdyż przewodnictwo diamentu jest wielokrotnie wyższe od przewodnictwa cieplnego jego imitacji i odparowanie wilgoci naniesionej chuchnięciem następuje z powierzchni diamentu o wiele szybciej niż z powierzchni jego substytutów.

3.5.2. Zwilżalność (adhezja)

Zjawisko łączenia się powierzchniowych warstw różnych ciał doprowadzonych do zetknięcia występuje dość często w życiu codziennym. Jest ono rezultatem oddziaływania sił pomiędzy cząsteczkami stykających się ciał, np. sił van der Waalsa. Zjawisko to określa się mianem adhezji, czyli przylegania, przywierania, przyczepności lub zwilżalności. Wielkość adhezji mierzy się siłą lub pracą potrzebną do oderwania stykających się ciał przypadającą na jednostkę powierzchni. W przypadku adhezji cieczy do ciała stałego siła potrzebna do jej oderwania jest zależna od napięcia powierzchniowego, w myśl wzoru:

$$P = \delta - \delta',$$

gdzie:

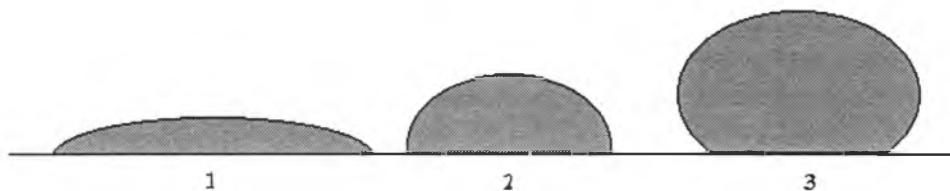
P — wielkość adhezji,

δ — napięcie powierzchniowe cieczy,

δ' — różnica napięć powierzchniowych na granicy ciała stałego/cieczy oraz ciała stałego/powietrza.

Napięcie powierzchniowe cieczy to siła działająca na jednostkę długości powierzchni swobodnej cieczy wywołana istnieniem międzycząsteczkowych sił przyciągania. Na cząsteczkę cieczy znajdującą się w jej wnętrzu działają siły

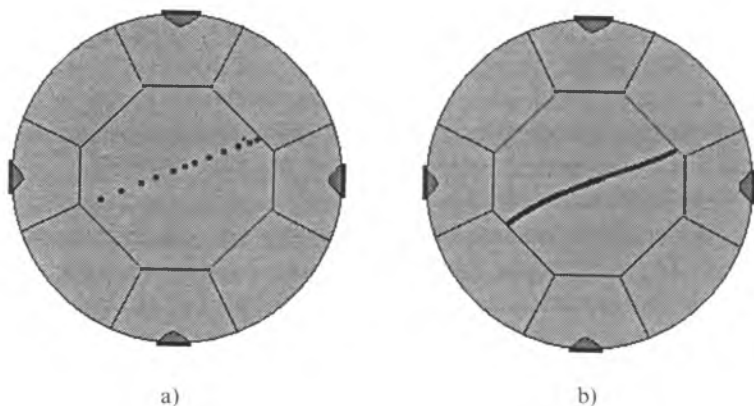
międzycząsteczkowe o różnym kierunku znoszące się wzajemnie. Na cząsteczkę cieczy znajdującą się na jej powierzchni i tuż pod powierzchnią, w warstwie podlegającej zasięgowi oddziaływań międzycząsteczkowych, działa siła wypadkowa oddziaływań międzycząsteczkowych skierowana od powierzchni cieczy do jej wnętrza. Powierzchniowa warstwa cieczy wywiera zatem na ciecz pewne ciśnienie zwane ciśnieniem wewnętrznym. Jeżeli na ciecz nie działają żadne inne siły, to jej powierzchnia pod wpływem działania siły ciśnienia wewnętrznego będzie dążyć do przybrania takiego kształtu, by siły te były skierowane prostopadłe do powierzchni, tzn. przybierać będzie kształt kulisty. Napięcie powierzchniowe maleje ze wzrostem temperatury cieczy. Zależy także od rodzaju i składu cieczy. Znaczne obniżenie napięcia powierzchniowego następuje po dodaniu do cieczy substancji powierzchniowo czynnych. Ułatwiają one zwilżanie cieczą powierzchni ciała stałego. Jeśli adhezja jest mniejsza od napięcia powierzchniowego cieczy ($P < \delta$), to ciecz nie zwilża ciała stałego i stara się zmniejszyć z nim powierzchnię kontaktu. Jeśli jest odwrotnie ($P > \delta$), to ciecz zwilża ciało stałe i stara się powiększyć powierzchnię kontaktu (rys. 156).



Rys. 156. Kształt kropli cieczy (wg Ramdohra, Strunza, 1978)
1 — dobrze zwilżającej, 2 — źle zwilżającej, 3 — nie zwilżającej

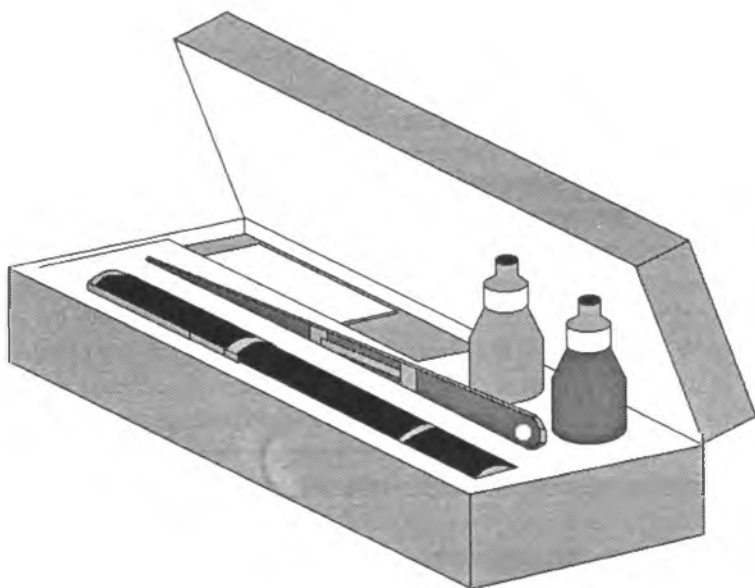
3.5.2.1. Testery zwilżalności

Zróznicowanie zdolności zwilżającej materiałów gemmologicznych przez pewne ciecze lub substancje znane było od dawna. Od niepamiętnych czasów wiadano, że diament nie daje się zwilżyć wodą, podczas gdy łatwo zwilża się tłuszczem. W rezultacie zróznicowaną adhezję wykorzystano do stworzenia testerów umożliwiających identyfikację określonych materiałów na podstawie zwilżalności. W tego rodzaju instrumentach ciecz zwilżająca jest tak dobrana, że gdy narys cieczy zwilżającej wykonany na oczyszczonej, polerowanej powierzchni obiektu ma postać linii ciągłej, jest potwierdzeniem trafnej identyfikacji materiału, natomiast w przypadku imitacji narys cieczy zwilżającej ma postać linii złożonej z ciągu odrębnych kropli (rys. 157). Dla większej precyzji uzyskany w taki sposób narys oceniany jest za pomocą lupy gemmologicznej. W podobny sposób ocenia się tzw. test kropłowy, gdy na powierzchnię testowanego obiektu nanosi się większą kroplę cieczy zwilżającej i obserwuje się jej zarys. Plamka ma inny zarys na obiekcie naturalnym (np. zaokrąglony), a inny na imitacji



Rys. 157. Narys taflii obiektu gemmologicznego cieczą zwilżającą
a) w postaci linii kropelkowej, b) w postaci linii ciągłej

(np. postrzępiony). Testery zwilżalności mają przeważnie dogodną w użytkowaniu postać pióra, w którego zasobniku umieszczona jest substancja zwilżająca. Do najbardziej rozpowszechnionych testerów tego rodzaju należy tzw. pióro diamentowe (Gem Diamond Pen; rys. 158). Tester ten jest przeznaczony do odróżniania diamentu od jego współczesnych imitacji. Uzyskany rezultat powinien być zawsze potwierdzony inną metodą identyfikacyjną.



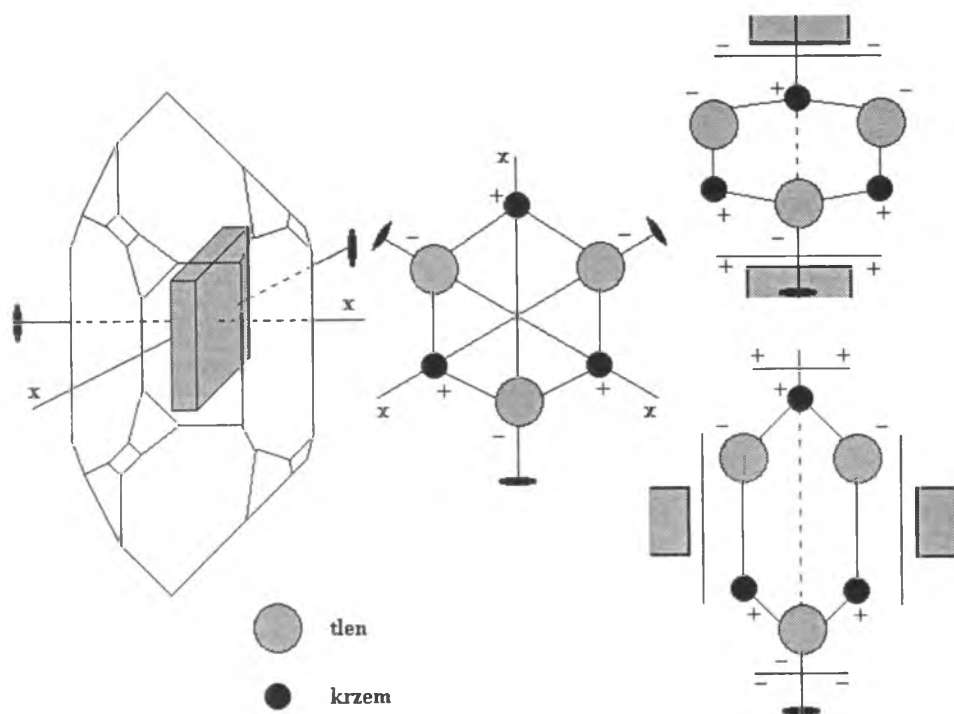
Rys. 158. Tester zwilżalności diamentu (tzw. pióro diamentowe)

Na zbliżonych zasadach opiera się pomiar tzw. kąta kontaktowego kropli wody umieszczonej na tafli szlifowanego obiektu. Typowa wartość kąta kontaktowego kropli wody umieszczonej na korundzie wynosi 95° , na YAG-u 93° , na tytanianie strontu 91° , na cyrkonii 91° , na GGG 84° , na rutylu 73° , na cyrkonie 60° , na diamencie 55° , a na kwarcu i szkle 0° . Badanie powinno się prowadzić na oczyszczonej i odtłuszczonej powierzchni.

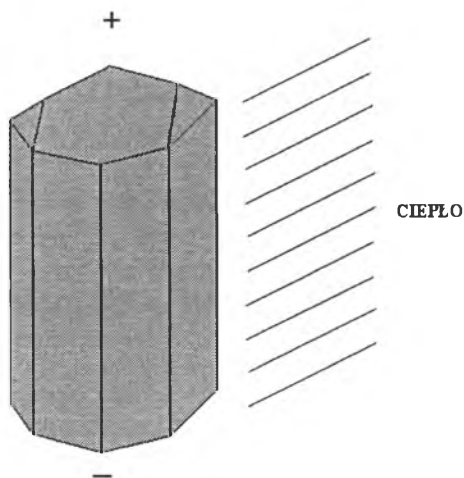
3.5.3. Właściwości elektryczne

Kryształy wykazują następujące właściwości elektryczne.

- Piezoelektryczność, polegającą na powstawaniu dipolowego ładunku elektrycznego na powierzchni kryształu pod wpływem ściskania lub rozciągania (rys. 159). Przyczynę tego zjawiska stanowi przemieszczenie się w sieci krystalicznej ładunków dodatnich względem ujemnych pod wpływem naprężeń mechanicznych. Najbardziej znanymi piezoelektrykami są kwarc, turmalin i sfaleryt.
- Piroelektryczność, polegającą na wytwarzaniu pod wpływem zmian temperatury różnoimiennych ładunków elektrycznych na przeciwległych ele-



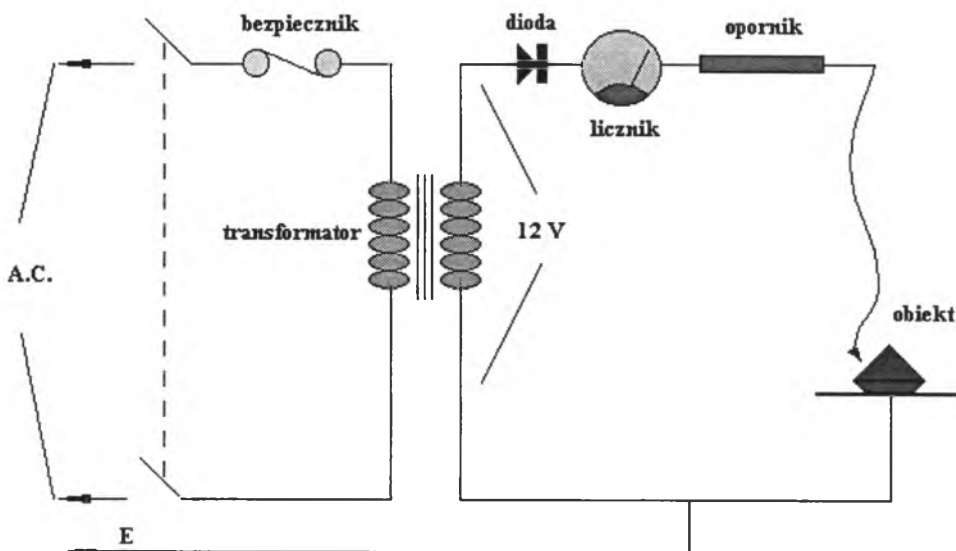
Rys. 159. Piezoelektryczność (na przykładzie kwarcu) (wg Ramdohra, Strunza, 1978)



Rys. 160. Piroelektryczność (na przykładzie turmalinu)

mentach powierzchni kryształu. Podczas oziębienia kryształu znaki ładunków elektrycznych ulegają zmianie. Zmiana temperatury powoduje zmianę orientacji elektrycznych momentów dipolowych ugrupowań jonów lub cząstek w kryształach, na którą może się nałożyć jeszcze efekt związany z rozszerzalnością kryształu. Najbardziej znane piroelektryki to turmalin (rys. 160), hemimorfit i skolecyt.

- Ferroelektryczność, polegająca na przekształcaniu się pewnych dielektryków w określonych zakresach temperatury w przewodniki. Najbardziej znane ferroelektryki to colemanit, piroluzyt i boracyt.
- Tryboelektryczność, polegająca na uzyskiwaniu ładunku elektrycznego przez potarcie. Najbardziej znane tryboelektryki to bursztyn, bakelit i niektóre inne tworzywa sztuczne. Bursztyn przez potarcie uzyskuje ładunek ujemny.
- Przewodnictwo elektryczne, polegające na zdolności kryształu do uporządkowanego ruchu ładunków w polu elektrycznym. Kryształy wykazują duże zróżnicowanie zdolności przewodzenia elektryczności. Na tej podstawie



Rys. 161. Ideogram testera przewodnictwa elektrycznego materiałów gemmologicznych

wyróżnia się: przewodniki (głównie metale), półprzewodniki i izolatory (dielektryki). Większość materiałów gemmologicznych to izolatory. Do wyjątków należy niebieski naturalny diament (typ IIb) i syntetyczny rutyl. Są one zaliczane do tzw. półprzewodników domieszkowych. Warto podkreślić, że niebieskie diamenty traktowane (barwione) są izolatorami. Przyczyną przewodnictwa naturalnego niebieskiego diamentu są defekty sieciowe, które zapewniają wytworzenie się dziur w podstawowym pasmie energetycznym (półprzewodnik typu p — tzw. przewodnictwo dziurowe kryształu). Diamenty wykazujące półprzewodnictwo typu p pochłaniają światło czerwone i pomarańczowe, co jest powodem niebieskiej barwy takich kryształów. Pomiaru przewodności elektrycznej obiektów gemmologicznych dokonuje się za pomocą testera o nazwie Gem Elektro Tester (rys. 161).

3.5.4. Magnetyzm

Magnes to ciało będące źródłem stałego pola magnetycznego. Zjawiska i właściwości materii związane z oddziaływaniem pola magnetycznego nazywa się magnetyzmem. Zjawiska magnetyczne są ściśle powiązane ze zjawiskami elektrycznymi. Właściwości magnetyczne wykazują wszystkie ciała, choć w różnym stopniu. Wynikają one z własności magnetycznych wchodzących w ich skład atomów, jonów i cząstek.

Podstawową cechą większości ciał umieszczonych w polu magnetycznym jest diamagnetyzm, czyli nietrwałe magnesowanie się ciała przeciwie do kierunku pola. Gdy magnesowanie jest trwałe, lecz oddziaływanie słabe, występuje wtedy paramagnetyzm. W przypadku silnych oddziaływań namagnesowania trwałego mamy do czynienia z ferromagnetyzmem.

Magnetyzm jest w gemmologii wykorzystywany nader rzadko — głównie do odróżniania hematytu od jego naśladownictw. Hematyt jest diamagnetykiem, podczas gdy jego imitacje są przeważnie ferromagnetykami lub paramagnetykami.

4. Wnętrze materiałów gemmologicznych

Materiały gemmologiczne mogą być: monokrystaliczne, a więc być pojedynczym kryształem, niekiedy dość znacznych rozmiarów, oraz polikrystaliczne, czyli być agregatem podobnej lub różnej wielkości kryształów tego samego rodzaju lub różnych rodzajów, a także amorficzne, czyli niekrystaliczne (np. przechłodzona ciecz, żel).

Wartość wielu materiałów gemmologicznych w dużym stopniu zależy od ich przezroczystości, a zatem od charakteru i jakości ich wnętrza. Materiały polikrystaliczne są przeważnie nieprzezroczyste lub tylko przeświecające. Podobne właściwości mają również naturalne substancje amorficzne. Tylko monokryształy mogą mieć idealną przezroczystość.

Przezroczystość to wielkość charakteryzująca zdolność ośrodka do przepuszczania światła padającego nań prostopadle bez zmiany kierunku. Pojęcie to, w odróżnieniu od przepuszczalności światła, nie uwzględnia światła rozproszonego, np. biały papier jest nieprzezroczysty, lecz przepuszczający światło rozproszone.

Przepuszczalność to wielkość charakteryzująca zdolność określonego ośrodka do przepuszczania światła, uwzględniająca także promieniowanie rozproszone.

Dla ciał nie rozpraszających światła obie wielkości, tj. przezroczystość i przepuszczalność, są jednakowe i równe stosunkowi natężenia światła przepuszczonego (I) do natężenia światła padającego prostopadle na ciało (I_0):

$$I/I_0 = e^{-kd},$$

gdzie:

d — grubość ośrodka,

k — współczynnik osłabienia (ekstynkcji), zależny od długości fali oraz budowy chemicznej i stanu substancji,

e — zasada logarytmu naturalnego.

Natężenie światła maleje w miarę przenikania w głąb ciała, ponieważ każde ciało pochłania część przechodzącego światła. Ilość pochłoniętego światła zależy od wielkości pokonanej drogi, ale także od długości fali użytego światła (λ). Zasięg światła (w) w materiale określa odwrotność współczynnika osłabienia (k), czyli:

$$w = 1/k.$$

Zazwyczaj pochłanianie ma charakter selektywny, wybiórczy. Oznacza to, że każde ciało z padającej nań wiązki światła wybiera pewną część barwnych składowych, które absorbuje w niejednakowym stopniu.

Jeśli pochłanianie i rozpraszanie fal elektromagnetycznych z widma widzialnego jest bardzo intensywne, to ciało pozostaje nieprzezroczyste.

Jeśli pochłanianie i rozpraszanie fal elektromagnetycznych jest niewielkie i równomierne w całym zakresie widma widzialnego, to zaistniałe zmiany są niezauważalne dla oka człowieka, a ciało pozostaje przezroczne i bezbarwne.

Jeśli pochłanianie i rozpraszanie fal elektromagnetycznych dotyczy tylko części widma widzialnego, to oko odnosi wrażenie przezroczystego ciała barwnego, a absorbowana barwa jest dopełniająca do zaabsorbowanej części widma.

Warto zaznaczyć, że ciała przezroczne w świetle widzialnym (np. szkło) mogą być nieprzezroczne w zakresie widmowym nadfioletu czy podczerwieni, bądź też ciała nieprzezroczne w świetle widzialnym bywają przezroczne dla nadfioletu lub podczerwieni.

Większość kryształów jest przezroczysta (np. krzemiany, glinokrzemiany, węglany, chlorki, siarczany). Jedynie kryształy kruszcowe na ogół są nieprzezroczyste (np. siarczki, arsenki, niektóre tlenki). Część kryształów wykazuje własności pośrednie, np. sfaleryt, wurcyt, cynober.

Materiały gemmologiczne ze względu na przezroczystość bywają dzielone na:

- przezroczne, jeśli oglądane przez ich obrys przedmioty, pismo itp. są wyraźnie widoczne, z dokładnie czytelnymi konturami, np. diament, kwarc—kryształ górski,
- półprzezroczne, jeśli oglądane przez nie przedmioty, pismo itp. będą zamglone, lecz rozpoznawalne, np. opał, kamień księżycowy,
- przeświecające, jeśli oglądane przez nie przedmioty, pismo itp. nie są widoczne, choć część światła zostaje przepuszczona przez obrys oświetlonego od spodu obiektu, np. jadeit, chalcedon,
- półprzeświecające, jeśli część światła przechodzi, lecz tylko w pobliżu brzegów obiektu, np. nefryt, turkus,
- nieprzezroczne, jeśli całkowicie nie przepuszczają światła, np. malachit, lapis-lazuli.

Przytoczony podział jest dyskusyjny i może wzbudzać pewne kontrowersje, gdyż wiele minerałów, które w grubszych płytkach są nieprzezroczne, okazuje się, że w odpowiednio cieńszych płytkach są przeświecające lub nawet przezroczne.

Przezroczystość większości materiałów jest uwarunkowana charakterem wiązań w kryształach. Przezroczyste mają zwykle wiązania jonowe, a ich powłoka elektronowa jest na ogół mało podatna na polaryzację pod wpływem relatywnie niskoenergetycznego promieniowania świetlnego. Nieprzezroczyste mają elektrony przewodnictwa łatwo współdziałające z falą świetlną, absorbując ją, np. metale rodzime, siarczki i pokrewne.

Przezroczystość i przepuszczalność kryształu może zostać zakłócona lub ograniczona:

- inkluzjami, czyli różnorodnymi wtrąceniami fluidalnymi (gazowymi, ciekłymi), oraz stałymi, zamkniętymi w kryształach w różnych etapach jego historii,
- zbliżnieniami, czyli prawidłowymi zrostami kryształów o podobnych lub identycznych sieciach krystalicznych zorientowanych wzajemnie równolegle według co najmniej dwóch elementów geometrycznych,
- niejednorodnościami składu chemicznego powodującymi wytworzenie się strefowości, pasowości lub sektorowości budowy (zonalność).

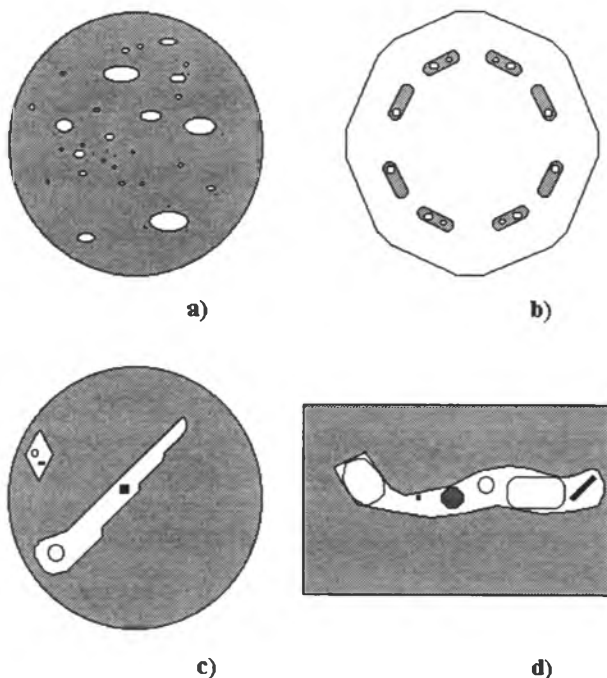
4.1. Inkluzje

Wtrącenia spotykane w kryształach mogą być ciałami stałymi (są to automorficzne lub ksenomorficzne kryształki różnych substancji, np. halitu, kalcytu, pirytu, rutylu, turmalinu, spinelu, bądź też zamknięte w kryształach fragmenty skały, w której wzrastał kryształ, np. ciasto skały magmowej), ciekłymi (są to najczęściej owalne przestrzenie wypełnione wodą, roztworem wodnym lub związkiem zbliżonym charakterem do węgłowodoru) lub gazowymi (są to najczęściej owalne przestrzenie wypełnione siarkowodorem, dwutlenkiem węgla, chlorowodorem, fluorowodorem, parą wodną).

Inkluzje mają budowę prostą lub złożoną. Na tej podstawie wyróżnia się inkluzje:

- jednofazowe, o charakterze ciała stałego bądź ciekłego, bądź też gazowego,
- dwufazowe, o charakterze ciała fluidalnego (faza gazowa w postaci pęcherzyka odmieszana w fazie ciekłej),
- trójfazowe, o charakterze ciała ciekłego, w którym występują odmieszane: faza gazowa (w postaci pęcherzyka) i faza stała (w postaci drobnego monokryształu),
- wielofazowe (polifazowe), o charakterze ciała ciekłego z odmieszanymi fazami stałymi i gazowymi (rys. 162).

Wszystkie inkluzje polifazowe można przekształcić w jednofazowe przez nagrzewanie. Proces ten jest nazywany homogenizacją. Temperatura homogenizacji odpowiada tej, przy której powstała inkluzja, czyli temperaturze krystalizacji materiału.



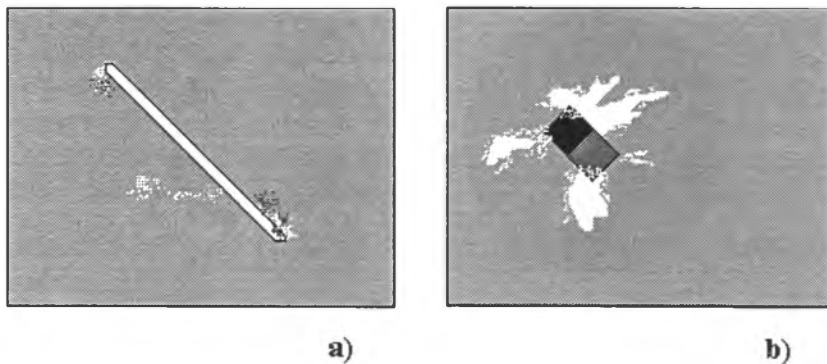
Rys. 162. Inkluzje jednofazowe (a), dwufazowe (b), trójfazowe (c) i wielofazowe (d)

Ciała tworzące inkluzje mogą powstawać:

- przed utworzeniem się zawierającego je kryształu; są to tzw. inkluzje pierwotne będące rezultatem inkorporacji wcześniej utworzonego ciała do tworzącego się aktualnie kryształu,
- w tym samym czasie co zawierający je kryształ; są to tzw. inkluzje syngenetyczne formujące się równocześnie z bardzo szybko rozrastającym się inkorporującym je kryształem,
- później niż zawierający je kryształ; są to tzw. inkluzje wtórne (epigenetyczne) będące rezultatem inkorporacji do uprzednio utworzonego już kryształu.

Wielkość i pokrój inkluzji bywają bardzo różne. Mogą to być obiekty widoczne tylko przy dużych powiększeniach mikroskopowych, ale bywają również takie, które można dogodnie obserwować okiem nieuzbrojonym. Jednak większość inkluzji jest na tyle nieduża, że dla ich obserwacji konieczne jest użycie binokularu gemmologicznego. Inkluzje stałe mogą mieć pokrój: igiełkowaty, włóknisty, blaszkowaty, pryzmatyczny lub graniasty (rys. 163). Niektóre z nich są nieprzezroczyste, jak np. kryształki piryty, magnetytu, inne bywają doskonale przezroczyste, np. kryształki halitu, kalcytu.

Zawartość i rozmieszczenie inkluzji również są rozmaite; wrosty mogą być rozmieszczone bezładnie (rys. 162a) lub w sposób uporządkowany nawiązujący do planu budowy zawierającego je kryształu (rys. 162b).



Rys. 163. Inkluzje stałe

a) igielkowaty cyrkon, b) graniasty uraninit z objawami tensji wokół wrostu. Pow. ok. 30 x

Uporządkowane rozmieszczenie i pokrój inkluzji są nieraz bezpośrednią przyczyną wielu barwnych zjawisk optycznych w materiałach gemmologicznych, np. kociego oka, tygrysiego oka, asteryzmu, mleczności, jedwabistości.

Ilość, rozmieszczenie i wielkość inkluzji wpływają bezpośrednio na czystość obiektu gemmologicznego. Oceny czystości dokonuje się zazwyczaj organoleptycznie w badaniu lupowym przez porównanie obiektu z zestawem wzorców. Jednak zestawami takimi dysponują tylko nieliczne, najbardziej zasobne instytucje gemmologiczne, np. duże, dobrze wyposażone laboratoria gemmologiczne afiliowane przy uniwersytetach lub towarzystwach gemmologicznych. Toteż większość rzeczoznawców dokonuje takiej oceny na podstawie opisów słownych i wzorców graficznych, podpierając się nabytym doświadczeniem. Temu celowi służą skale czystości, które opierają się przeważnie na kryteriach subiektywnych, głównie jakościowych (tab. 25). Podejmuje się liczne próby uproszczonego zobiektywizowania oceny czystości, jednak z różnym skutkiem.

Tabela 25

Skala czystości diamentów

Oznaczenie (klasa czystości)	Opis polski	Opis międzynarodowy
IF	czyste pod lupą gemmologiczną	internally flawless
VVS	bardzo bardzo mało znamion* pod lupą gemmologiczną	very very slightly imperfect
VS	bardzo mało znamion pod lupą gemmologiczną	very slightly imperfect
SI	mało znamion pod lupą gemmologiczną	slightly imperfect
I ₁ , (P ₁)	znamiona niewidoczne gołym okiem	imperfect 1 (pique 1)
I ₁ , (P ₂)	znamiona zauważalne gołym okiem	imperfect 2 (pique 2)
I ₃ , (P ₃)	znamiona widoczne gołym okiem	imperfect 3 (pique 3)

* Wyróżnia się znamiona wewnętrzne (inkluzje, rysy łupliwości, rysy przełamu, spękania, zmętnienia, zbliźniaczenia, zonalność wzrostową itp.) oraz znamiona zewnętrzne (naturalne płaszczyzny kryształu, wszelkie uszkodzenia tafli, krawędzi, fasetek, rondysty i koletu, dodatkowe fasetki, niedopolerowania itp.).

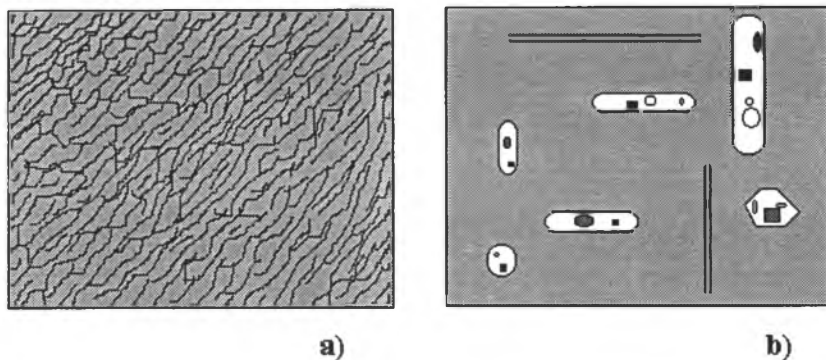
Czasem przyjmuje się tylko jedno kryterium oceny wpływu wtrąceń na czystość obiektu gemmologicznego. Wtrącenia o tyle obniżają czystość, o ile przeszkadzają w brylancji światła w obiekcie.

Wyniki badania czystości przedstawia się bądź za pomocą symboli, bądź metodą graficzną, lokalizując wady czystości na specjalnych schematach pokazujących główne plany obiektów szlifowanych (koronę, podstawę, rondystę). Rozróżnia się przy tym wady wnętrza (wrostki punktowe, ciemne plamki, bezbarwne kryształy, ciemne wrostki, ślady linii wzrostu, pęknięcia itp.) oraz tzw. błędy zewnętrzne (kawerny, nierówności rondysty, rysy z polerowania, dodatkowe fasetki, zaokrąglony lub ukruszony kolet itp.).

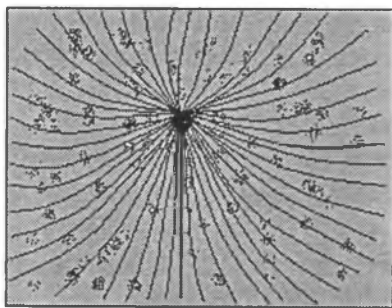
Do inkluzji przywiązuje się dużą wagę, gdyż ich obecność może wpływać na zachowanie się obiektu podczas obróbki. Dwutlenek węgla jest zawarty w wielu inkluzjach dwufazowych (ciekło-gazowych). Przemianie fazowej ulega już w temperaturze około 30°C. Jako gaz może osiągnąć znaczne ciśnienie przekraczające nieraz wytrzymałość zawierającego je obiektu. W rezultacie podczas obróbki powodującej przyrost temperatury obiekt może ulec łatwo zniszczeniu wskutek rozsadzenia, np. podczas szlifowania, traktowania. Nie zawsze musi to prowadzić do jego rozerwania. Często tworzy się tylko aureola dekrepitacji wokół homogenizowanej inkluzji. Aureola taka ma zwykle postać nierównej, nieregularnej, dyskowatej powierzchni wyścielonej licznymi, drobnymi, kropelkowatymi skupiskami substancji wypełniającej uprzednio inkluzję.

Skupiska inkluzji w obiektach gemmologicznych mogą mieć swoisty wygląd, zauważalny dopiero pod binokulem lub lupą gemmologiczną. Na tej podstawie wyróżnia się między innymi:

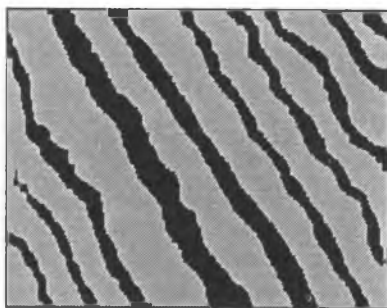
- „szron”, czyli drobne, dość płaskie inkluzje wypełnione fazą ciekłą lub ciekłą i gazową, stanowiące zbliżnienie rozległego pęknięcia we wnętrzu kryształu (rys. 164a),



Rys. 164. Inkluzje ciekłe (skupiska)
a) typu „szron”, b) typu „kryształ negatywny”. Pow. ok. 30 ×



a)



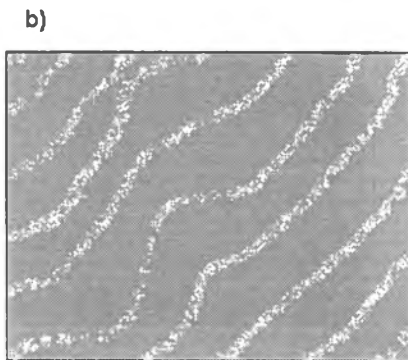
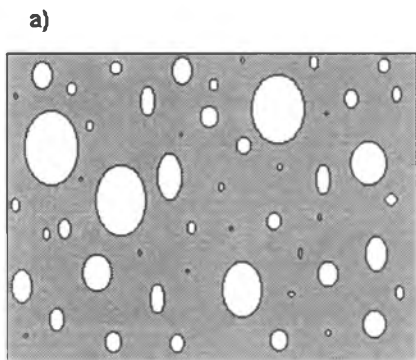
b)

Rys. 165. Inkluzje stałe (skupiska)

a) typu „koński ogon”, b) typu „zebra”. Pow. ok. 30 ×

- „kryształy negatywne”, czyli inkluzje będące idealnym powtórzeniem formy zawierającego je kryształu, np. sześcianu w fluorycie, ośmiościanu w spinelu (rys. 164b),
- „koński ogon”, czyli skupiska włóknistych inkluzji tworzących charakterystyczny pukiel (rys. 165a),
- „zebrę”, czyli pasmowo i wstęgowo rozmieszczone skupiska drobnych inkluzji (rys. 165b),
- „chmurkę”, czyli obłokopodobne skupiska subtelnych kryształków nagromadzone w ograniczonej, przeważnie płaskiej przestrzeni obiektu.

Inkluzje gazowe wyróżniają się postacią sferyczną i bywają skupione w pobliżu szczególnych powierzchni kryształu, np. będących kolejnymi strefami narastania kryształu (rys. 166).



Rys. 166. Inkluzje gazowe

a) rozmieszczone bezładnie (pow. ok. 30 x), b) rozmieszczone zgodnie ze strefami narastania (pow. ok. 8 ×)

Inkluzje są często tak typowe dla pewnych kryształów, że wykorzystuje się je w roli znaczącej cechy diagnostycznej, szczególnie w celu odróżniania materiałów naturalnych od syntetycznych i traktowanych. Ich szczegółowy opis, bogato ilustrowany barwnymi zdjęciami, można znaleźć w monograficznym opracowaniu E. J. Gübelina, J. I. Koivuli: *Photoatlas of inclusions*, wydany przez ABC Edition z Zurychu (1986). Szczegółowe badanie inkluzji niejednokrotnie prowadzi do ustalenia źródła materiału gemmologicznego, np. złoża, z którego wydobyto materiał naturalny, lub producenta materiału syntetycznego. To zadanie jest coraz trudniejsze z uwagi na fakt, że fabrykanci najlepszych materiałów syntetycznych opanowali już technologie umożliwiające wytworzenie inkluzji bardzo podobnych do tych, które są spotykane w ich odpowiednikach naturalnych.

W praktyce gemmologicznej funkcjonuje również pojęcie *wrostka*. Mianem tym określa się wszystkie ciała obce znajdujące się we wnętrzu obiektu gemmologicznego. Zgodnie z tą konwencją *inkluzją* określa się jedynie te ciała, które są hermetycznie zamknięte w przestrzeni obiektu i które z zawierającym je materiałem mają wyraźny kontakt fazowy. Niekiedy pojęcie *inkluzja* bywa ograniczane jeszcze bardziej i stosowane tylko do wtrąceń spotykanych w bursztynie.

4.2. Zrosty

Kryształy mogą asocjować ze sobą w sposób: *przypadkowy*, gdy ułożone są względem siebie bezładnie, lub *uporządkowany*, gdy ułożone są względem siebie w przybliżeniu równoległe, lub też *prawidłowy*, gdy dochodzi do zrastania się kryształów.

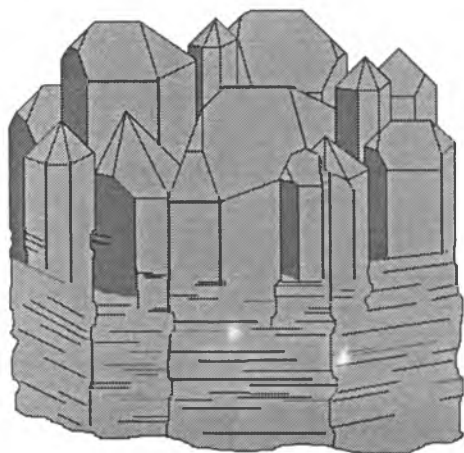
W sposób prawidłowy mogą się zrastać kryształy:

- tej samej substancji,
- różnych substancji.

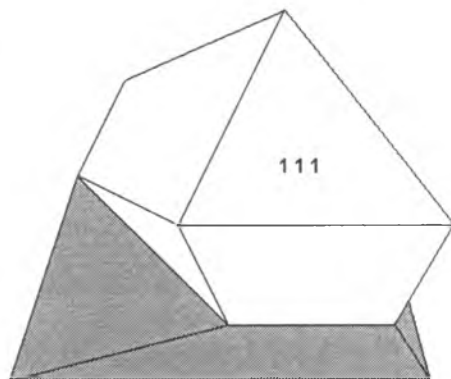
Zrosty kryształów tej samej substancji mogą być:

● **równoległe**, gdy wszystkie elementy budowy wewnętrznej oraz postaci zewnętrznej, tj. ściany i krawędzie, a także wszystkie elementy symetrii zrastających się osobników są do siebie równoległe (rys. 167); najczęściej spotyka się zrosty równoległe kryształów kwarcu, fluorytu, barytu, kalcytu;

● **bliźniacze**, gdy tylko niektóre elementy budowy wewnętrznej i postaci zewnętrznej oraz symetrii zrastających się osobników są do siebie równoległe (rys. 32, 168); bliźniak wykazuje obecność elementów symetrii bliźniaczej: osi bliźniaczej lub płaszczyzny bliźniaczej; elementy te nie występują w pojedynczym kryształ; każdy z tych elementów pozwala przeprowadzić zrośnięte prawidłowo osobniki jeden w drugi; granicę między zbliźnionymi osobnikami stanowi powierzchnia zwana szwem bliźniaczym; zrosty bliźniacze mogą być podwójne



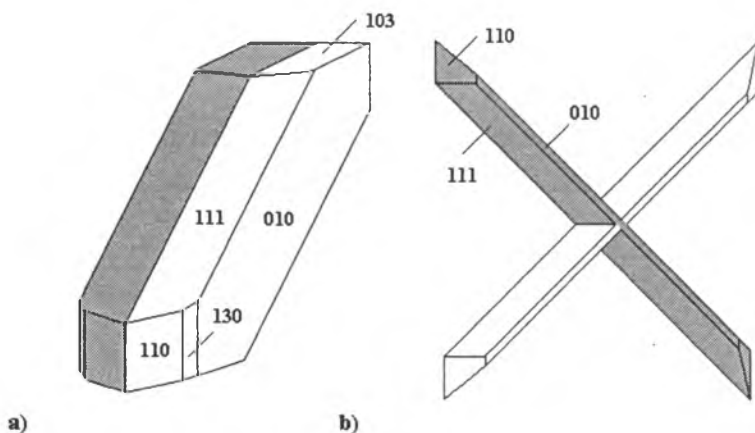
Rys. 167. Zrost równoległy (na przykładzie kwarcu)



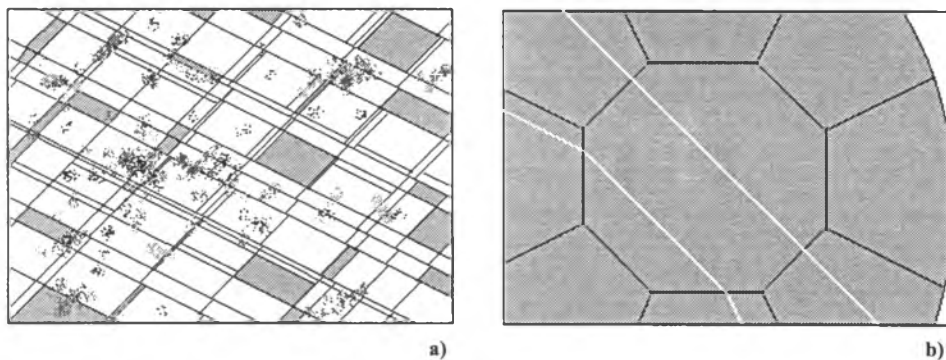
Rys. 168. Zrost bliźniaczy (na przykładzie spinelu; bliźniak wg (111))

(tzw. dwojaki, rys. 168, 169) lub wielokrotne (tzw. bliźniaki polisyntetyczne, rys. 170); na podstawie wzajemnego położenia zrosniętych osobników wyróżnia się bliźniaki stykowe, gdy szew bliźniaczy oddziela wyraźnie uczestniczące w zroście kryształy, oraz bliźniaki przerosłe, gdy kryształy uczestniczące w zroście przenikają się wzajemnie (rys. 169).

Zrosty kryształów różnych substancji mają bardziej urozmaicony charakter. Najbardziej znane są **zrosty epitaktyczne** (por. rys. 33). Ich powstanie jest uwarunkowane daleko idącą analogią w budowie wewnętrznej zrastających się kryształów obu substancji.



Rys. 169. Zrosty bliźniacze (na przykładzie gipsu)(wg Ramdohra, Strunza, 1978)
a) stykowe, b) przerosłe



Rys. 170. Zrosty bliźniacze polisyntetyczne (na przykładzie korundu)
a) rubin, b) szafir

Spotyka się również zrosty kryształów różnych substancji polegające na ich wzajemnym przerastaniu się lub wrastaniu w siebie. Zjawisko to dotyczy często substancji mających zdolność odmieszania się roztworu stałego, np. różniące się składem kryształy skaleni tworzą tzw. przerosty pertytowe i antypertytowe. Podobne zjawisko występuje wśród piroksenów. Może dotyczyć również kryształów substancji różniących się znacząco składem chemicznym, np. tzw. przerosty pismowe kwarcu w skaleniu. Powierzchnie owych zrostów mogą być widoczne już okiem nieuzbrojonym lub dopiero po zastosowaniu dodatkowych środków obserwacji: np. lupy gemmologicznej, binokularu, imersjoscopu.

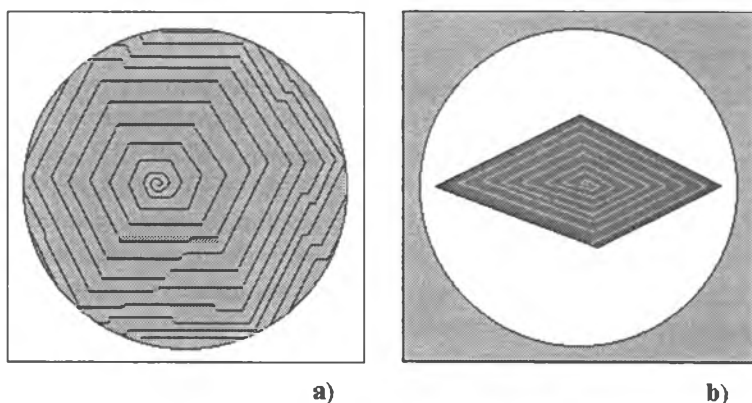
Obecność zrostów obniża czystość materiału gemmologicznego i wpływa znacząco na inne jego parametry fizyczne, a zwłaszcza optyczne, powodując np. zakłócenia w biegu światła w obiekcie zawierającym zrosty. Zmusza to często do stosowania dodatkowych fasetek w nakładanym szlifie. Tym samym obniża się jakość nakładanego szlifu. Występowanie zrostów wpływa przeważnie ujemnie na wartość materiału gemmologicznego. Jednak w niektórych materiałach gemmologicznych obecność uporządkowanych, powtarzających się systematycznie, lamelek bliźniaczych jest zjawiskiem korzystnym i staje się przyczyną występowania niektórych atrakcyjnych barwnych efektów optycznych podnoszących walory estetyczne obiektu gemmologicznego, jak adularescencja, labradorescencja.

4.3. Niejednorodność składu (zonalność)

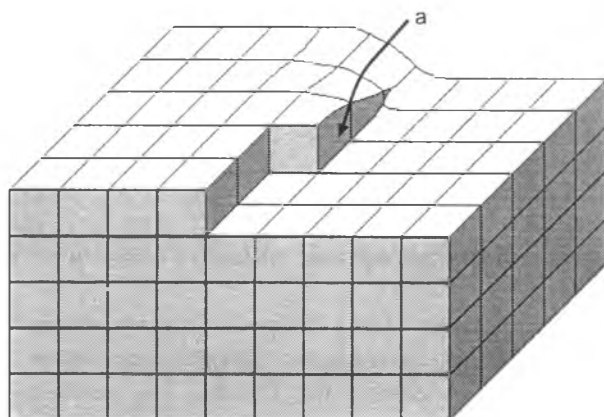
Kryształy są produktem wielu różnych procesów fizykochemicznych — kondensacji, wytrącania, parowania. Krystalizacja może przebiegać zarówno w fazie gazowej czy ciekłej, jak i stałej. Na przebieg tych procesów ma wpływ wiele różnych czynników, jak temperatura, ciśnienie, skład reagentów czy substratów. Kształtują one warunki krystalizacji.

W pierwszej fazie krystalizacji dochodzi do utworzenia się zarodka, czyli początkowego aglomeratu atomów, jonów lub cząstek tworzących przyszły kryształ. Warunkiem rozpoczęcia się zarodkowania jest przechłodzenie pary czy stopu lub przesycenie roztworu. Zarodek po osiągnięciu wielkości krytycznej zaczyna wzrastać spontanicznie wskutek dyfuzji substratów ku jego powierzchni. Przyjmuje się, że wzrost kryształu dokonuje się poprzez ciągłe narastanie tej samej warstwy przyjmującej postać nieprzerwanej spirali, czyli tzw. spirali wzrostu (rys. 171), przy czym początkiem spirali wzrostu są najczęściej tzw. dyslokacje (rys. 172).

Wzrost kryształu odbywa się zazwyczaj w warunkach fluktuacji czynników mających decydujący wpływ na przebieg krystalizacji. Fluktuacja ta może mieć różny przebieg, np. cykliczny, narastający, malejący, nieregularny. W rezultacie w kryształach daje się często zauważyć wyraźne wewnętrzne zróżnicowanie



Rys. 171. Spirala wzrostu w karborundzie (a) i parafinie (b) (wg Bolewskiego i in., 1990)

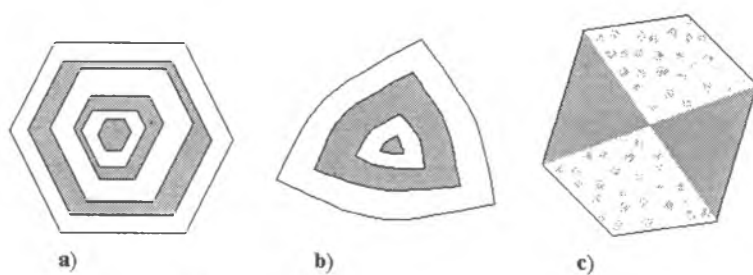


198 Rys. 172. Dyslokacja (a) i schemat spiralnego wzrostu kryształu (wg Bolewskiego i in., 1990)

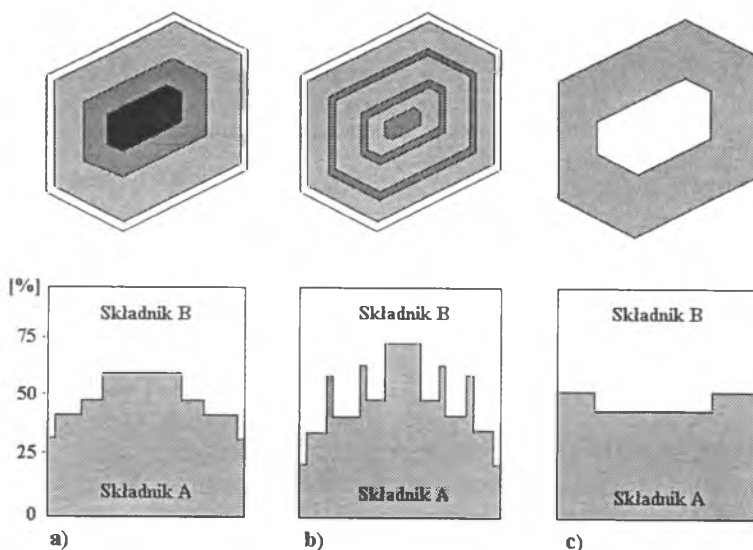
odzwierciedlające przebieg fluktuacji warunków krystalizacji. Zróżnicowanie to określa jednocześnie stopień niejednorodności kryształu. Podstawową przyczyną niejednorodności wielu kryształów są fluktuacje koncentracji substratów uczestniczących w budowie kryształu w poszczególnych etapach jego wzrostu. Najbardziej efektownym wyrazem zmian towarzyszących krystalizacji jest strefowa budowa wielu kryształów. Strefowość budowy kryształu może się wyrażać poprzez pasowość (rys. 173a,b) lub sektorowość (rys. 173c).

Pasowość jest odzwierciedleniem zmian w czasie towarzyszących poszczególnym etapom wzrostu kryształu. Pasowość kryształu może mieć charakter:

— normalny, odzwierciedlając okresowe zmiany warunków krystalizacji przy stałym ubożeniu substratu w określony składnik (rys. 174a),



Rys. 173. Strefowa budowa kryształów
a) szafiru, b) turmalinu, c) piroksenu



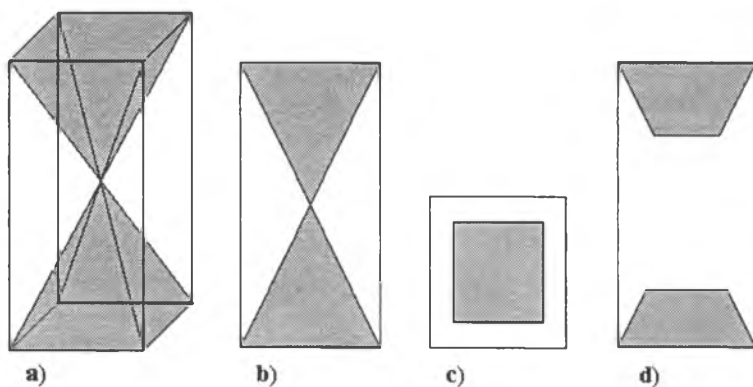
Rys. 174. Pasowa budowa kryształu

a) normalna, b) oscylacyjna, c) inwersyjna (wg Borkowskiej, Smulikowskiego, 1973)

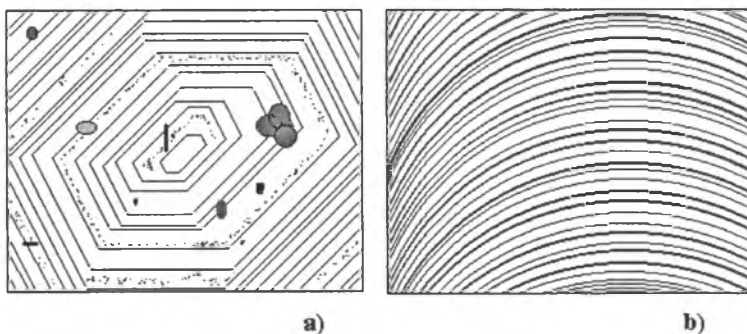
- oscylacyjny, gdy jest wynikiem anomalnych, powtarzających się w czasie, okresowych nawrotów do minionych warunków krystalizacji (rys. 174b),
- inwersyjny, gdy jest wynikiem reakcji ukształtowanego już kryształu ze swoim otoczeniem (rys. 174c).

Sektorowość jest natomiast odzwierciedleniem zmian zaistniałych w różnych częściach przestrzeni kryształu kształtowanego przez krystalizację w określonych momentach jego wzrostu. W kryształach o budowie sektorowej ściany słupowe różnią się zwykle nieco składem chemicznym od rozbudowywanych równocześnie ścian piramidalnych. Oznacza to, że kryształ w czasie wzrostu odmiennie dobierał sobie składniki wykorzystywane do rozbudowy w poszczególnych płaszczyznach (rys. 175).

W pewnych kryształach strefy wzrostu są widoczne makroskopowo, głównie na podstawie różnic ich barwy, w innych ujawnienie budowy strefowej wymaga zastosowania dodatkowych środków obserwacji, np. imersjoscopu, mikroskopu



Rys. 175. Budowa sektorowa kryształów
a) rzut przestrzenny, b—d) najczęściej spotykane przekroje



Rys. 176. Strefy wzrostu w korundzie naturalnym (a — rubin) i syntetycznym (b — metoda Verneuila)

polaryzacyjnego. Linie stref wzrostu mogą mieć różny geometryczny wyraz zależny od warunków i przebiegu krystalizacji. Przekonująco i dobitnie ilustruje tę różnicę porównanie wyglądu linii wzrostu kryształów naturalnych z liniami wzrostu kryształów syntetycznych otrzymywanych metodą Verneuil (rys. 176). W kryształach naturalnych prostoliniowe granice strefy przyrostu są wielokrotnym powtórzeniem naturalnej formy kryształu, np. oktaedru, słupa heksagonalnego. W kryształach syntetycznych łukowato przebiegające granice strefy narastania są widocznym dowodem wzrostu kryształu poprzez stopniowe nadbudowywanie substratu dostarczanego sukcesywnie do aktywnej powierzchni wzrostu, którą była górna powierzchnia tzw. gruszki.

4.4. Materiały polikrystaliczne i amorficzne

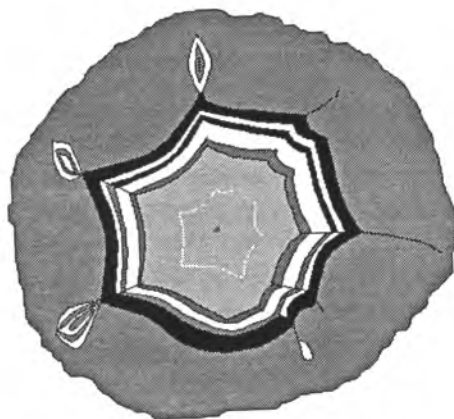
Niektóre materiały gemmologiczne mogą być agregatami kryształów lub skupieniami substancji amorficznej.

W zależności od wielkości kryształów wchodzących w skład agregatów wyróżnia się materiały: grubokrystaliczne, średniokrystaliczne, drobnokrystaliczne, mikrokrystaliczne i kryptokrystaliczne.

Składniki krystaliczne mogą być rozmieszczone w przestrzeni skały w różny sposób i w różnym stopniu przestrzeń tę zapelniać. Na tej podstawie wyróżnia się materiały o teksturze:

- od uporządkowanej (kierunkowej) do bezładnej (bezkierunkowej) oraz
- od masywnej (zbitej) do silnie porowatej.

Kryształy wchodzące w skład agregatu mogą mieć różny pokrój (np. blaszkowy, słupowy, igiełkowy, graniasty). Mogą one tworzyć różne skupienia, np. warstewkowe, promieniste, współśrodkowe, groniaste. W rezultacie różnej wielkości kryształów, zmieniającego się sposobu ich rozmieszczenia w przestrzeni materiału, a także w wyniku różnej zawartości drobnodyspersyjnych pigmentów, przekroje niektórych materiałów dostarczają specyficznego rysunku (deseń) będącego niekiedy jedną z bardziej wyróżniających jego cech (rys. 177). Jednocześnie deseń ów często decyduje o walorach estetycznych takiego materiału.



Rys. 177. Deseń teksturalny agatu

5. Syntetyczne materiały gemmologiczne

Syntetyczne materiały gemmologiczne można podzielić na **monokrystaliczne**, będące pojedynczym kryształem odpowiednio dużych rozmiarów, **polikrystaliczne**, będące agregatem wielu kryształów odpowiednio mniejszych rozmiarów i **amorficzne** będące przechłodzonym stopem, zestalonym żelom itp.

Materiały polikrystaliczne mogą być:

- jednofazowe, czyli złożone z wielu kryształów tej samej substancji krystalicznej,
- wielofazowe, czyli złożone z wielu kryształów różnych substancji.

Metody otrzymywania kryształów syntetycznych zaczęto rozwijać już w XIX wieku. Jednak dopiero bieżące stulecie stało się okresem ich intensywnego rozwoju. Opanowano już techniki otrzymywania materiałów syntetycznych o takiej jakości, że przewyższają one często właściwościami najwyższej jakości materiały naturalne. Większość opanowanych dotychczas technologii otrzymywania materiałów syntetycznych skierowana jest na produkcję materiałów monokrystalicznych.

Metody otrzymywania syntetycznych kryształów można podzielić na wykorzystujące:

- określony substrat, który znajduje się w innym stanie niż oczekiwany produkt (np. ciekłym, gazowym) i który poprzez stopniowe modyfikowanie warunków fizycznych, np. ciśnienia, temperatury, doprowadzany jest do stanu oczekiwanego, np. monokrystalicznego; w tej grupie znajdują się techniki, które zależnie od stanu wyjściowego substratu można pogrupować na stosujące wzrost kryształu w fazach: stałej, ciekłej lub gazowej,

- rozpuszczenie określonej substancji w innej lub w innych substancjach; rozpuszczona substancja poprzez kontrolowaną zmianę warunków fizykochemicznych, np. stopnia nasycenia roztworu, doprowadzana jest do oczeki-

wanego stanu krystalicznego; w tej grupie mieszczą się liczne techniki polegające np. na krystalizacji z roztworu wodnego, z fazy gazowej, z roztworu bezwodnego; techniki te różnią się również sposobem transportu krystalizującego składnika; może to być transport przez konwekcję lub dyfuzję, bądź też stymulowany mechanicznie oddziaływaniem zewnętrznym.

Innym kryterium podziału metod otrzymywania materiałów syntetycznych jest wielość substratów uczestniczących w syntezie. Na tej podstawie wyróżnia się:

- Metody wykorzystujące substrat jednoskładnikowy. Można je zgrupować w metody stosujące przejście substratu ze stanu:

- a) stałego w stały, np. odszklenie, przemiana fazowa, wyżarzanie,
- b) ciekłego w stały, np. metoda Czochralskiego, Verneuila, Kryopulosa, Stöbera, Bridgmana, wędrującej strefy stopionej,
- c) gazowego w stały, np. sublimacja — kondensacja, wzrost w próżni.

- Metody wykorzystujące substraty wieloskładnikowe. Można je pogrupować w metody stosujące przejście substratów ze stanu:

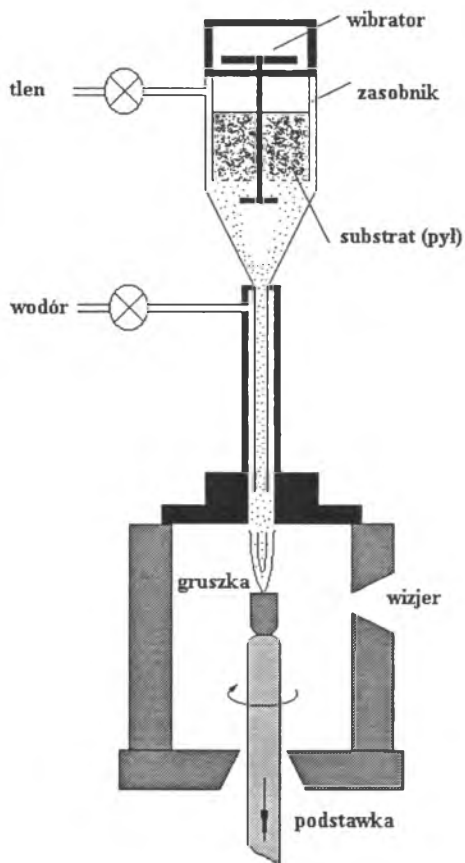
- a) stałego w stały, np. krystalizacja w roztworze stałym,
- b) ciekłego w stały, np. wzrost z roztworu, wzrost poprzez reakcję chemiczną lub elektrochemiczną w roztworze wodnym, bezwodnym, w warunkach hydrotermalnych, kriogenicznych,
- c) gazowego w stały, np. wzrost poprzez reakcje odwracalne, heteroepitaksję.

5.1. Metody otrzymywania monokryształów

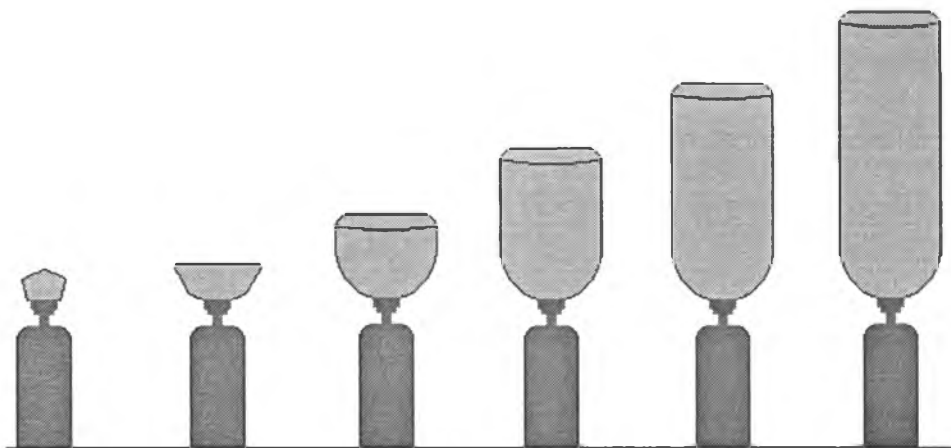
Dla otrzymywania monokrystalicznych materiałów gemmologicznych największe znaczenie mają następujące metody.

Metoda Verneuila

Metoda Verneuila polega na wysokotemperaturowej, np. w temperaturze 2100°C, syntezie silnie rozdrobnionego substratu występującego pierwotnie w stałym stanie skupienia (\varnothing około 1 μm). Substrat uczestniczący w tej syntezie powinien się odznaczać nadzwyczajną czystością i dyspergowalnością. Proces wytwarzania monokryształu odbywa się w tzw. piecu Verneuila (rys. 178). Krystalizacja substratu rozpoczyna się od zarodka, który formuje się w wyniku stopienia początkowej ilości sproszkowanego substratu w płomieniu palnika wodorowo-tlenowego. Wzrost dopływu tlenu powoduje wzrost temperatury i rozszerzenie podstawy kryształu (rys. 179). Utrzymanie stałej temperatury na aktywnej powierzchni rozrastającego się kryształu umożliwia mechanizm stopniowego obniżania podstawy kryształu. Po wytworzeniu się oczekiwanej wielkości kryształu (tzw. gruszki) następuje jego stopniowe chłodzenie i odprężenie. 203

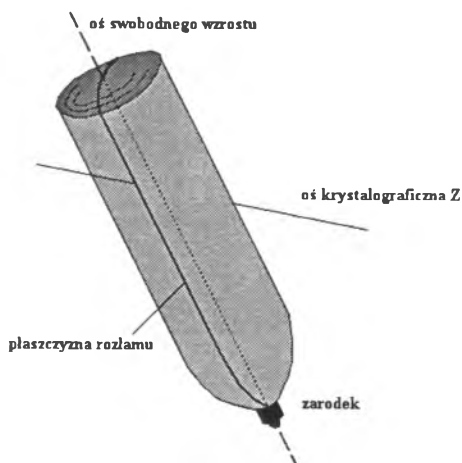


Rys. 178. Piec do produkcji monokryształów metodą Verneuila (wg Reada, 1991)



Rys. 179. Stadia rozwoju „gruszki” korundowej otrzymywanej metodą Verneuila (wg Nassaua, 1980)

Do odprężenia gruszki syntetycznego korundu wykorzystuje się np. płaszczyzną łupliwości wyznaczoną przez położenie osi wzrostu kryształu i osi krystalograficznej Z (rys. 180). Przy swobodnym wzroście gruszki korundowej oś krystalograficzna Z jest odchylona od osi wzrostu monokryształu o pewien charakterystyczny dla każdej wytwórni kąt, np. o 60° . Nacięcie wykonane zgodnie z tą płaszczyzną powoduje pęknięcie kryształu na dwie części. Stan płaszczyzny rozłamu informuje o naprężeniach kryształu. Ten sposób usuwania naprężeń likwiduje około $\frac{1}{3}$ napięć powstałych podczas krystalizacji i chłodzenia. Kryształy takie mogą być też odprężane przez wygrzewanie w wysokiej temperaturze i bardzo powolne schładzanie. Ten sposób usuwania naprężeń zapobiega wytwarzaniu się łupliwości. W wytworzonym monokryształe ocenia się także zawartość zagazowań, zmętnień i pęknięć.



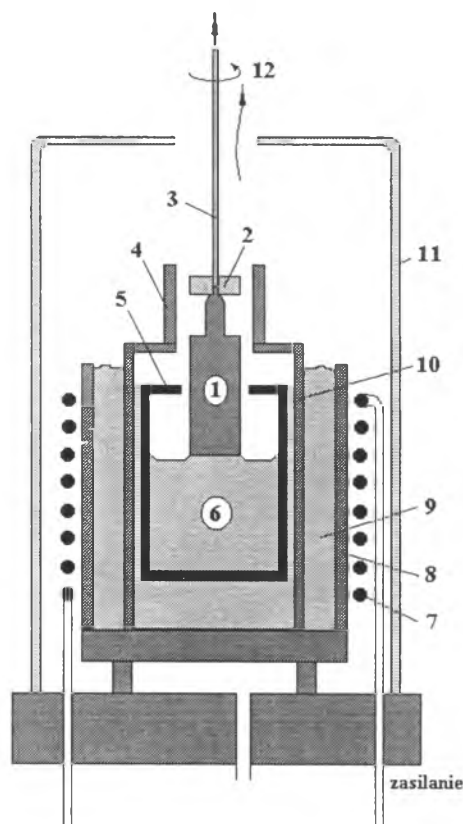
Rys. 180. Odprężanie „gruszki” korundowej poprzez wywołanie przełamu wykorzystującego płaszczyznę łupliwości wyznaczaną osią wzrostu i osią krystalograficzną Z (wg P ł a s z y ń s k i e j, 1988)

Metoda Verneuil jest ciągle udoskonalana. Wysiłek racjonalizatorów zmierza do stworzenia możliwości otrzymywania kryształów o idealnych własnościach. Dotychczas tą metodą zdołano opanować syntezę monokryształów ponad stu różnych substancji. Metoda Verneuil pozwala uzyskiwać duże monokryształy o umiarkowanej jednorodności i czystości, zawierające dość często drobne wtrącenia nadtopionego substratu.

Metoda Czochralskiego

Jest to metoda polegająca na stapianiu substratu w wysokotemperaturowym tyglu i wyciąganiu kryształu ze stopu (rys. 181). Krystalizację rozpoczyna się od zarodka, który jest wyciągany z fazy ciekłej z określoną prędkością, adekwatną do czasu potrzebnego na sformowanie narastającego stopniowo kryształu. Proces takiej krystalizacji wymaga stosowania atmosfery ochronnej

lub próżni, wysokiej czystości substratu oraz tygla inertnego chemicznie w warunkach wysokiej temperatury. Metoda ta pozwala uzyskiwać kryształy o dużej jednorodności i wysokiej czystości, większej niż w wytwarzanych metodą Verneila.



Rys. 181. Piec do otrzymywania monokryształów metodą Czochralskiego (wg Nassaua, 1980)

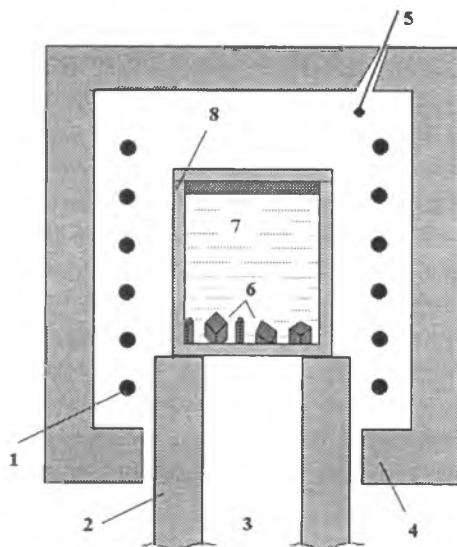
1 — monokryształ, 2 — zarodek, 3 — pręt wyciągający, 4 — cyrkonowy płaszcz tygla, 5 — tygiel irydowy lub rodowy, 6 — stop substratu, 7 — spirala grzejna, 8 — płaszcz krzemowy, 9 — proszek cyrkonowy, 10 — pokrywa cyrkonowa, 11 — klosz szklany, 12 — zawór odprowadzający gazy

Metoda *flux-melt*, czyli krystalizacji z roztworu bezwodnego

Polega ona na stosowaniu topników tworzących roztwórz z krystalizowanym materiałem. Taką mieszaninę podgrzewa się w platynowym tyglu, stale mieszając, aż do uzyskania jednorodnego, bezwodnego roztworu. Powolne chłodzenie, które może trwać nawet wiele dni, prowadzi do wykrystalizowania z roztworu kryształów (rys. 182). Cały proces przebiega w warunkach normalnego ciśnienia. Otrzymane kryształy oswobadza się z zakrzepłego roztworu, stosując selektywne rozpuszczanie. Metodą tą można wytwarzać kryształy raczej niskiej jakości,

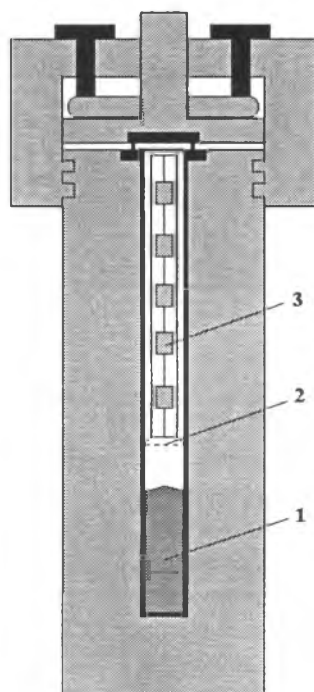
Rys. 182. Piec do otrzymywania kryształów metodą krystalizacji z roztworu bezwodnego (wg Nassaua, 1980)

1 — spirala grzejna, 2 — podest, 3 — otwór drenujący, 4 — izolacja cieplna, 5 — czujnik temperatury, 6 — rosnące kryształy, 7 — roztwór, 8 — tygiel platynowy



Metoda hydrotermalna, czyli krystalizacji z roztworu wodnego

Metoda hydrotermalna wykorzystuje zjawisko zwiększonej rozpuszczalności niektórych substancji zachodzące w roztworach wodnych w temperaturze poniżej punktu krytycznego wody. Rozpuszczalność pewnych substancji w ta-



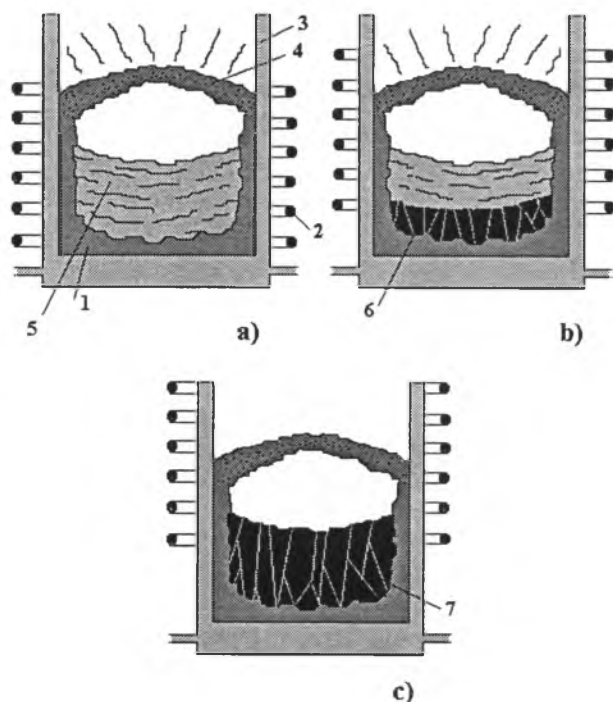
Rys. 183. Autoklaw do otrzymywania kryształów metodą krystalizacji z roztworu wodnego (wg Nassaua, 1980)

1 — substrat, 2 — przegroda, 3 — zarodki

kich warunkach jest na tyle duża, że stwarza to możliwość uzyskania przesyconia roztworu w gradiencie temperatury. Proces krystalizacji przebiega w autoklawie (rys. 183). Zapewnia on utrzymanie przez potrzebny czas odpowiedniego gradientu temperatury i ciśnienia. Krystalizacja zapoczątkowywana jest na zarodkach zawieszonych w przesyconym roztworze wodnym. Roztwór jest zasilany z dna autoklawu, gdzie znajduje się rozpuszczający się stopniowo substrat. Nasycony roztwór wskutek konwekcji przemieszcza się stopniowo ku górze. Ochłodzenie i przesyconienie roztworu jest powodem krystalizacji na zarodkach. W celu zwiększenia rozpuszczalności stosuje się różne dodatki, np. alkaliów. Proces jest długotrwały i może trwać nawet około jednego roku. Tym samym jest to proces dość kosztowny. Warunki, w których odbywa się krystalizacja, są zbliżone do naturalnych. Otrzymywane produkty różnią się jednak od naturalnych.

Metoda Bridgmana

Metoda opiera się na stopniowym schładzaniu stopionej uprzednio masy substratu. Kryształy formują się na dnie tygla i rosną aż do całkowitego wyczerpania się masy stopionego substratu (rys. 184). Metoda ta jest szczególnie chętnie stosowana do krystalizacji substancji o bardzo wysokiej temperaturze topnienia. Osiąganie jej bez szkody dla tygla jest możliwe dzięki wytwarzaniu się

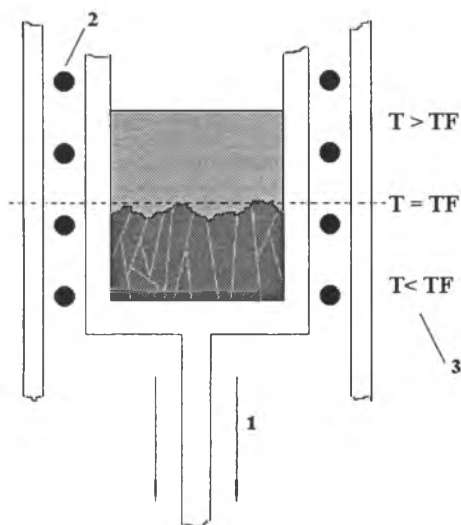


Rys. 184. Piec do otrzymywania kryształów metodą Bridgmana przez krystalizację stopionej masy substratu

1 — autotygiel, 2 — ogrzewanie indukcyjne, 3 — płaszcz z krążącym chłodziwem, 4 — skorupa zakrzepłej masy substratu, 5 — stopiony substrat, 6 — rosnące kryształy, 7 — ostateczny produkt krystalizacji; a), b), c) fazy krystalizacji stopionej masy substratu

tw. autotygła formującego się z nie stopionej warstwy tej samej substancji, która podlega topnieniu. Wytworzenie się czerepu autotygła zachodzi dzięki zastosowaniu efektywnego schładzania ścian tygła właściwego, co zapobiega stopieniu warstwy substratu przylegającej bezpośrednio do ścian tygła właściwego i jednocześnie stanowi jego ochronę przed działaniem wysokiej temperatury i reaktywnością stopionego substratu. Ogrzewanie silnym polem elektrycznym (piec indukcyjny) pozwala dobrze kontrolować rozkład wysokiej temperatury wewnątrz tygla. Dodatkową korzyścią wynikającą z istnienia autotygła jest łatwość zachowania wysokiej czystości procesu, gdyż ściany autotygła mają ten sam skład chemiczny co zawarty w tyglu stop.

Wariantem tej metody jest wzrost kryształów w warunkach ruchomego gradientu temperatury, gdy tygiel zawierający stopioną masę opuszcza się stopniowo przez obszar stałego gradientu temperaturowego (rys. 185). Wzrost kryształów następuje na powierzchni posiadającej temperaturę zbliżoną do temperatury topnienia substratu.



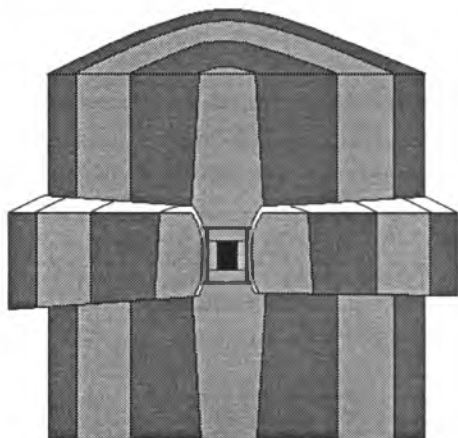
Rys. 185. Piec do otrzymywania kryształów metodą Bridgmana przez krystalizację stopionej masy substratu w ruchomym gradientie temperatury (wg Nassaua, 1980)

1 — ruchomy tygiel, 2 — ogrzewanie, 3 — gradient temperatury (T); TF — temperatura topnienia

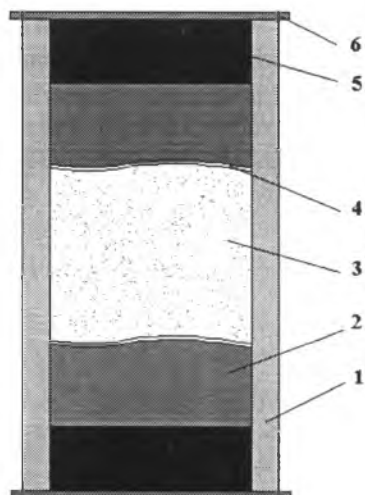
Synteza kryształów w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury

Jest to metoda zasadzająca się na wywołaniu rekrytalizacji substratu działaniem podwyższonego ciśnienia w warunkach odpowiednio zwiększonej temperatury. W tym celu stosuje się różne sposoby uzyskiwania takich warunków. Najbardziej udane urządzenia tego typu składają się z kilku przeciwstawnych trzpieni zaciskających się współśrodkowo (rys. 186). Przestrzeń największych ciśnień jest ogrzewana elektrycznie. Prasy tego rodzaju pozwalają osiągać ciśnienia rzędu 100 tys. atmosfer w temperaturach rzędu kilku tysięcy stopni Celsjusza. Jednocześnie warunki takie mogą być podtrzymywane przez bardzo

długi czas. W procesie wysokociśnieniowej i wysokotemperaturowej rekryształizacji stosuje się także tzw. mineralizatory, czyli substancje o właściwościach katalitycznych (rys. 187). Spełniają one często również funkcję topnika tworzącego roztwór z krystalizowaną substancją.



Rys. 186. Prasa do wytwarzania wysokich ciśnień i temperatur (przekrój) (wg Nassaua, 1980)



Rys. 187. Pojemnik do syntezy kryształów w warunkach bardzo wysokiego ciśnienia i temperatury (wg Nassaua, 1980)

1 — materiał uszczelniający (np. pirofyllit),
2 — kryształy zarodkowe (pył), 3 — substrat,
4 — membrana, 5 — katalizator, 6 — metalowa okładka

5.2. Produkty i producenci

5.2.1. Syntetyczne monokryształy

Syntetyczny korund (rubin, szafir)

Własności fizykochemiczne korundów syntetycznych i naturalnych są bardzo podobne. Korund syntetyczny jest uzyskiwany metodami: Verneüla, Czochralskiego, *flux-melt* i hydrotermalną.

A. Korund otrzymywany metodą Verneüla

Korund jest produkowany w wielu krajach, również w Polsce (Skawina). Monokryształy syntetycznego korundu mogą mieć różną barwę zależną od zastosowanych dodatków, np. syntetyczny rubin — dodatek tlenku chromu,

syntetyczny szafir niebieski — dodatek tlenku żelaza i tlenku tytanu, syntetyczny szafir żółty — dodatek tlenku niklu, syntetyczny szafir zielony — dodatek tlenku kobaltu, tlenku magnezu, tlenku cynku i tlenku wanadu, syntetyczny szafir fioletowy — dodatek tlenku chromu, tlenku żelaza i tlenku tytanu, syntetyczny szafir z efektem aleksandrytu — dodatek tlenku wanadu, syntetyczny padparadża — dodatek tlenku niklu. Syntetyczny korund może być też bezbarwny (tzw. syntetyczny szafir biały lub syntetyczny leukoszafir). Dzieje się tak wówczas, gdy w jego syntezie nie stosowano dodatków barwiących. Syntetyczne monokryształy otrzymywane tą metodą różnią się od naturalnych obecnością krzywoliniowych, łukowato wygiętych stref wzrostu oraz występowaniem skupień pęcherzykowatych inkluzji gazowych. Spotyka się również wtrącenia nadtopionego substratu. Syntetyczny rubin wyróżnia się ponadto nieco silniejszą fluorescencją w porównaniu z kryształami naturalnymi. Dla ujawnienia tej różnicy dobrze jest posłużyć się naturalnym wzorcem. Niebieski syntetyczny szafir wykazuje niebieskawą, a zielony — pomarańczową fluorescencję w długofalowym ultrafiolecie (UVL) i różowo-brunatną w krótkofalowym ultrafiolecie (UVC), podczas gdy naturalne szafiry tej samej barwy są w tych warunkach inertne. Syntetyczny korund z nałożonym szlifem przeważnie ma oś optyczną ułożoną równolegle względem tafli, podczas gdy podobnie szlifowane obiekty naturalne mają oś optyczną ustawioną prostopadle względem tafli, a ich szlif fasetkowy bywa asymetryczny lub nieco nieregularny.

B. Korund otrzymywany metodą Czochralskiego

Kryształy o cechach materiału gemmologicznego produkowane są przez kilka wytwórni znajdujących się w Stanach Zjednoczonych i Japonii. Są to: Laser Crystal Corporation — New Jersey, USA; Deltronics — New Jersey, USA; Crystal Optics Research — Kalifornia, USA; Kyocera International Inc. „Inamori” — Kyoto, Japonia. Syntetyczny korund otrzymywany metodą Czochralskiego wyróżnia się dobrą jakością. W zasadzie nie zawiera inkluzji i widocznych stref wzrostu, a tylko sporadycznie obserwuje się występowanie niewielkich niejednorodności polegających na obecności pęcherzykowatych inkluzji gazowych, bardzo drobnodispersyjnych zmętnień i słabo wyróżnialnych stref wzrostu kryształu. Głównym przeznaczeniem najlepszych jakościowo kryształów jest wykorzystanie przemysłowe, np. w produkcji laserów. W użytkowaniu gemmologicznym zwykle spotykane są, otrzymywane tą metodą, korundy wykazujące asteryzm (syntetyczne rubiny gwiazdziste).

C. Korund otrzymywany metodą *flux-melt*

Korund otrzymywany tą metodą produkowany jest głównie w Stanach Zjednoczonych i Austrii. Dostarczają go następujące wytwórnie:

- C. F. Chatham (San Francisco, Kalifornia, USA): syntetyczne rubiny, syntetyczne szafiry oraz syntetyczne padparadża,

- J. Osmer Crystals Co. — „Ramura” (Los Angeles, Kalifornia, USA): tylko syntetyczne rubiny,
- Kashan Inc. (Austin, Teksas, USA): syntetyczne rubiny oraz syntetyczne szafiry różowe,
- P. O. Knischka (Styer, Austria): syntetyczne rubiny,
- J. Lechleitner (Innsbruck, Austria): syntetyczne rubiny i różnobarwne syntetyczne szafiry, np. niebieskie, pomarańczowe, zielone, żółte oraz syntetyczne leukosafiry, a także syntetyczne szafiry z efektem aleksandrytu.

Wnętrze syntetycznego korundu uzyskiwanego metodą *flux-melt* jest bardzo podobne do wnętrza kryształów naturalnych; inkluzje gazowe tworzą skupienia pierzaste, skrzydełkowe lub przypominające drobne krople deszczu; inkluzje stałe to nieprzezroczyste płytki platyny o heksagonalnym zarysie. Strefy wzrostu mają prostoliniowy przebieg i w obiektach z nałożonym szlifem przecinają go na wskroś lub też krzyżują się ze sobą pod kątem 120° , podobnie jak to bywa w obiektach naturalnych.

Syntetyczne rubiny otrzymywane metodą *flux-melt* wykazują fluorescencję taką samą, jak rubiny naturalne. Niektóre wytwórnie znakują swoje produkty dodatkiem pierwiastków ziem rzadkich, co powoduje charakterystyczną fluorescencję w barwie żółto-pomarańczowej. Otrzymywane tą samą metodą syntetyczne szafiry ujawniają w całym zakresie ultrafioletu fluorescencję w barwie niebieskiej. Jest ona mocniejsza od fluorescencji tej samej barwy szafiru naturalnego.

D. Korund otrzymywany metodą hydrotermalną

Wytwarzany jest głównie w Stanach Zjednoczonych, Rosji i prawdopodobnie na Ukrainie. Wytwórnia C. F. Chatham (San Francisco, Kalifornia, USA) prowadzi eksperymentalną produkcję polegającą na nakładaniu metodą hydrotermalną cienkich warstw rubinu syntetycznego na jądro z rubinu naturalnego. Próby wytwarzania syntetycznych rubinów metodą hydrotermalną podejmowano na terenie Rosji w Instytucie Technologii Monokryształów Rosyjskiej Akademii Nauk w Nowosybirsku. Prace takie prowadzi się w Rosji prawdopodobnie także w Instytucie Przemysłu Jubilerskiego, w Petersburskim Instytucie Technologicznym oraz w Instytucie Syntezy Materiałów Mineralnych. Również na Ukrainie w Lwowskim Biurze Technologiczno-Konstrukcyjnym Przemysłu Jubilerskiego prawdopodobnie podejmuje się próby syntezy rubinu metodą hydrotermalną. Ponieważ jest to głównie produkcja eksperymentalna, więc materiały o takim charakterze są raczej rzadko spotykane, choć od 1993 roku obserwuje się już wyraźny wzrost udziału korundu otrzymywanego metodą hydrotermalną w ogólnym bilansie tego materiału.

Najbardziej charakterystyczną cechą wnętrza syntetycznych rubinów otrzymywanych metodą hydrotermalną są dość wyraźnie widoczne strefy wzrostu wpływające ograniczająco na przezroczystość i nadające obiektom wykonanym

z takiego rubinu aspekt „uśpiania”. Strefy te często mogą formować rysunek przypominający „jodelkę”. Inkluzje ciekłe w syntetycznych kryształach rubinu są bardzo podobne do analogicznych inkluzji rubinów naturalnych. Inkluzje stałe to kryształki miedzi, żelaza, niklu i tytanu występujące bądź pojedynczo, bądź w skupiskach. Wyróżnia je szczególny metaliczny połysk o złocistym odcieniu. Niekiedy występują nie zidentyfikowane inkluzje „igielkowate”, które jeszcze do niedawna uznawano za dowód naturalnego pochodzenia rubinu. W syntetycznym rubinie hydrotermalnym inkluzje gazowe tworzą charakterystyczne skupiska o wyglądzie „odcisku palca” (linii papilarnych).

**Syntetyczny beryl (syntetyczne: szmaragd, akwamaryn, beryl zielony,
beryl różowy, beryl żółty, beryl bezbarwny)**

Syntetyczny beryl otrzymuje się metodą *flux-melt* oraz metodą hydrotermalną. Właściwości chemiczne berylu syntetycznego i naturalnego są identyczne, natomiast ich właściwości fizyczne nieco się różnią.

A. Beryl otrzymywany metodą *flux-melt*

Produkowany jest w Stanach Zjednoczonych, Japonii, Francji, Niemczech i Rosji. Wszystkie kraje wykorzystują tę metodę tylko do otrzymywania syntetycznego szmaragdu. W Stanach Zjednoczonych produkcją syntetycznego szmaragdu zajmuje się wytwórnia C. F. Chatham (San Francisco, Kalifornia), w Japonii firmy Kyocera International In. „Inamori” (Kyoto) oraz Matsushima Kogyo Co. „Bijoreve”, we Francji — Société Française pour la Distribution de Produits Manufacturés „Lennix” (Cannes) oraz P. Gilson, który opracowaną i wypróbowaną technologię przekazał japońskiej firmie Nakazumi Earth Crystals Co. W Niemczech jest to wytwórnia W. Zerfass (Idar-Oberstein), w Rosji Instytut Technologii Monokryształów Rosyjskiej Akademii Nauk (Nowosybirsk).

Syntetyczny szmaragd otrzymywany metodą *flux-melt* różni się od naturalnego następującymi właściwościami:

- inkluzjami, które w syntetycznych szmaragdach są kryształkami platyny i(lub) fenakitu oraz płaskimi wtrąceniami ciekłymi zgrupowanymi w skupiska przypominające pismo klinowe,
- fluorescencją, której intensywność jest w syntetycznych szmaragdach umiarkowana do słabej, a barwa różowoceglasta (tylko syntetyczne szmaragdy otrzymywane w procesie Gilsona (typ III) nie ujawniają fluorescencji),
- współczynnikami załamania światła, które w syntetycznych szmaragdach są niższe od współczynników refrakcji szmaragdów naturalnych, z wyjątkiem syntetycznego szmaragdu uzyskiwanego w procesie Gilsona (typ III), który pod tym względem jest dość podobny do szmaragdu naturalnego,

- gęstością właściwą niższą u szmaragdów naturalnych z wyłączeniem syntetycznego szmaragdu uzyskiwanego w procesie Gilsona (typ III), który z uwagi na gęstość właściwą jest bardzo podobny do szmaragdu naturalnego.

B. Beryl otrzymywany metodą hydrotermalną

Beryl taki produkuje się w Australii, Stanach Zjednoczonych, Austrii i na Ukrainie. Metodą hydrotermalną uzyskuje się syntetyczny beryl o różnej barwie, np. zielonej, różowej, żółtej lub bezbarwny, lecz tylko produkcja syntetycznego szmaragdu ma znaczenie komercyjne. W Australii głównymi wytwórcami są: Biron Minerals Pty., Ltd. oraz Pool Mining Company Pty., Ltd., którym stara się dorównać Crystals Research Co. (Melbourne). Firmy te zajmują się wytwarzaniem syntetycznego szmaragdu. Podobny produkt dostarcza na rynki światowe austriacka firma J. Lechleitner (Innsbruck). Amerykańskie wytwórnie Vacuum Ventures Inc., „Regency” (Kalifornia) i Union Carbide Co., „Linde” oprócz dostawy syntetycznego szmaragdu podejmują również eksperymentalną produkcję syntetycznego berylu barwy różowej oraz syntetycznego berylu bezbarwnego. Podobnie zróżnicowaną gamę produktów daje Lwowskie Biuro Technologiczno-Konstrukcyjne Przemysłu Jubilerskiego (Ukraina). Wytwarza się tam syntetyczny akwamaryn, syntetyczny beryl zielony, syntetyczny beryl różowy, syntetyczny beryl czerwony, syntetyczny beryl purpurowy oraz syntetyczny szmaragd.

Syntetyczny szmaragd otrzymywany hydrotermalnie różni się od szmaragdu naturalnego:

- niższymi współczynnikami załamania światła,
- niższą gęstością właściwą,
- fluorescencją, która jest umiarkowana do silnej i ma barwę czerwoną,
- inkluzjami, którymi są kryształki fenakitu i wtrącenia dwufazowe o rureczkowatym pokroju; obfitość inkluzji rurkowatych może powodować wystąpienie barwnego efektu optycznego jedwabistości.

Metodę hydrotermalną wykorzystuje się również do pokrywania warstewką szmaragdu syntetycznego obiektów wykonanych z naturalnego szmaragdu (np. J. Lechleitner, Innsbruck, Austria). Zazwyczaj obiekt przewidziany do pokrycia syntetycznym szmaragdem ma już nałożony szlif. Po zakończeniu procesu pokrywania wykonuje się zatem tylko końcowe polerowanie. Obiekty takie rozpoznaje się na podstawie różnicy cech warstewki syntetycznej i naturalnego jądra. Na przykład inkluzje w warstewce szmaragdu syntetycznego mają cechy wtrąceń szmaragdu hydrotermalnego, podczas gdy inkluzje wewnętrznej części obiektu są typowe dla szmaragdu naturalnego. Jednocześnie powierzchnia fasetek takiego obiektu może wykazywać obecność odbarwionych szczelin lub pęknięć.

Metodą hydrotermalną produkowane są też syntetyczne szmaragdy składające się z kilku warstw (tzw. syntezy wielowarstwowe), przy czym zarodkiem

w takich obiektach może być zarówno szmaragd naturalny, jak i syntetyczny (np. J. Lechleitner, Innsbruck, Austria). Po zastosowaniu odpowiednich środków obserwacji poszczególne warstwy wchodzące w skład takiego obiektu są dość dobrze wyróżnialne.

Syntetyczny chryzoberyl (syntetyczny aleksandryt)

Własności fizykochemiczne chryzoberylu naturalnego i syntetycznego są takie same. Chryzoberyl syntetyczny wytwarza się metodą Czochralskiego i metodą *flux-melt*.

A. Chryzoberyl otrzymywany metodą Czochralskiego

Chryzoberyl produkowany jest głównie w Stanach Zjednoczonych, w Japonii i w Rosji. W ilościach handlowych wyrabia się metodą Czochralskiego tylko syntetyczny aleksandryt. Aby wywołać efekt aleksandrytu, używa się dodatku tlenku chromu. Produkcją syntetycznego aleksandrytu zajmują się następujące firmy: w Stanach Zjednoczonych Allied Chemical Co. (New Jersey), J. Osmer Crystals Co. (Kalifornia), Litton Airtron, „Allexite” (New Jersey), w Japonii — Kyocera International Inc. (Kyoto), w Rosji — Instytut Technologii Monokryształów Rosyjskiej Akademii Nauk (Nowosybirsk).

Syntetyczny aleksandryt wytwarzany metodą Czochralskiego jest bardzo podobny do aleksandrytu naturalnego. Odróżnienie ich na podstawie inkluzji, charakteru stref wzrostu, barwy i intensywności fluorescencji, czyli z wykorzystaniem możliwości gemmologii podstawowej, może być bardzo kłopotliwe. Syntetyczny aleksandryt jest przeważnie czysty. Tylko sporadycznie daje się w nim wyróżnić krzywoliniowe, łukowate strefy wzrostu, inkluzje gazowe oraz drobnodyspersyjne „zadymienia”.

B. Chryzoberyl otrzymywany metodą *flux-melt*

Produkty tego rodzaju pochodzą ze Stanów Zjednoczonych i z Rosji. W krajach tych wytwarza się wyłącznie syntetyczny aleksandryt. W Stanach Zjednoczonych technologię produkcji syntetycznego aleksandrytu metodą *flux-melt* opanowała firma Creative Crystals Inc. „Created Alexandrite” (San Ramon), w Rosji zaś jest to Instytut Technologii Monokryształów Rosyjskiej Akademii Nauk (Nowosybirsk).

Syntetyczny aleksandryt wytwarzany metodą *flux-melt* jest dość podobny do aleksandrytu naturalnego. Ich rozróżnienie standardowymi metodami gemmologicznymi może być kłopotliwe. Najłatwiej dostrzegalne różnice to występowanie w syntetycznym aleksandrycie specyficznych, właściwych mu inkluzji:

— metalicznych w postaci tabliczek platyny o pokroju trygonalnym lub heksagonalnym,

- ga z o w y c h w postaci silnie wydłużonych rureczek i kanalików o niezbyt regularnym przebiegu będących powodem „zadymienia” pewnych partii kryształu,
- i g i e ł k o w a t y c h o podobnej, wzajemnie równoległej orientacji w przestrzeni kryształu.

W syntetycznym aleksandrycie można ponadto obserwować strefy wzrostu w postaci równoległe rozmieszczonych, jednakowo wyglądających pasm. Mogą one być wykorzystywane jako dodatkowa cecha identyfikacyjna.

Syntetyczny spinel

Otrzymuje się go metodą Verneuil'a i metodą *flux-melt*. Własności fizykochemiczne syntetycznego spinelu wytwarzanego metodą *flux-melt* oraz czerwonego spinelu syntetycznego otrzymywanego metodą Verneuil'a nie różnią się od analogicznych własności spinelu naturalnego. Inne odmiany barwne syntetycznego spinelu produkowane metodą Verneuil'a mają wyższe wartości parametrów fizykochemicznych w porównaniu z analogicznymi własnościami odpowiednich barwnych odmian spinelu naturalnego.

A. Spinel otrzymywany metodą Verneuil'a

Spinel jest produkowany we Francji, w Szwajcarii, w Australii i w Stanach Zjednoczonych. Do uznanych wytwórni należą: H. Djévahirdjian S.A. (Montreux) ze Szwajcarii i S. Bajkowski (Annecy) z Francji. Metodą Verneuil'a uzyskuje się zarówno syntetyczne spinele bezbarwne, jak i wszystkich innych barw. Głównymi dodatkami barwiącymi w produkcji barwnych odmian spinelu syntetycznego są chrom, żelazo i kobalt.

Opisane dotychczas materiały syntetyczne, takie jak korund, beryl, chryzoberyl produkuje się w celu naśladowania ich pierwowzorów naturalnych. Natomiast syntetyczny spinel wytwarza się po to, by imitował inne materiały niż spinel naturalny. Na przykład niebieskawy spinel syntetyczny produkuje się z zamiarem naśladowania akwamarynu (berylu). W rezultacie barwa nadawana syntetycznemu spinelowi jest rzadko barwą spinelu naturalnego, np. czerwoną. Produkcja dokładnego odpowiednika spinelu naturalnego jest podejmowana okazjonalnie. Wynika to między innymi z trudności technologicznych, które przy takiej wytwórczości trzeba pokonać.

Syntetyczny spinel otrzymywany metodą Verneuil'a różni się od spinelu naturalnego:

- charakterem inkluzji; są to pęcherzykowate i nitkowate inkluzje gazowe,
- widmem absorpcji światła widzialnego, z wyjątkiem widma syntetycznego spinelu czerwonego,
- intensywnością fluorescencji, która jest silna do umiarkowanej,
- anomalną dwójłomnością.

W syntetycznym spinelu czerwonym bywają wyróżniane krzywoliniowe, łukowate strefy narastania kryształu, które wraz z gazowymi inkluzjami pozwalają łatwo odróżnić go od pierwowzoru naturalnego tej samej barwy.

B. Spinel otrzymywany metodą *flux-melt*

Jedynym producentem syntetycznego spinelu otrzymywanego tą metodą jest Instytut Technologii Monokryształów Rosyjskiej Akademii Nauk w Nowosybirsku, gdzie w ilościach komercyjnych wytwarza się syntetyczny spinel czerwony. Tytułem eksperymentu podejmowano tam tą metodą również produkcję syntetycznego spinelu niebieskiego.

Kryształy syntetycznego spinelu różnią się od pierwowzoru naturalnego występowaniem:

- pęknięć tensyjnych wypełnionych gazem i relikdami topnika,
- inkluzji stałych w postaci metalicznie połyskujących kryształków platyny.

Warto zaznaczyć, że nie zawsze te cechy są obecne. W takich przypadkach odróżnienie spinelu naturalnego od syntetycznego metodami gemmologii klasycznej może być kłopotliwe.

Syntetyczny kwarc (syntetyczne: ametyst, cytryn, kryształ górski, morion, kwarc różowy, awenturyń, kocie oko kwarcowe, kwarc niebieski, kwarc zielony)

Kwarc syntetyczny o przeznaczeniu gemmologicznym jest wytwarzany metodą hydrotermalną. Własności fizykochemiczne kwarcu syntetycznego i naturalnego nie różnią się. Największymi dostawcami na światowe rynki kwarcu syntetycznego produkowanego metodą hydrotermalną są: Stany Zjednoczone, Rosja, Wielka Brytania i Japonia. W Stanach Zjednoczonych najważniejsi wytwórcy to:

- Sawyer Research Products (Ohio),
- Bell Telephone Co. (New York),
- Western Electric Co. (Massachusetts),
- Brush Wellman Inc. (Ohio).

W Wielkiej Brytanii produkcją kwarcu hydrotermalnego zajmuje się Standard Telephone and Cables.

Wymienieni dotychczas producenci dostarczają na światowe rynki głównie bezbarwny kwarc syntetyczny. Jedynie Sawyer Research Products, podobnie jak wytwórnie rosyjskie i japońskie, oferują różne barwne odmiany syntetycznego kwarcu, np. niebieską, żółtą, zieloną, różową, fioletową, pomarańczową. Barwne odmiany syntetycznego kwarcu otrzymuje się dzięki:

- dodatkowi pewnych pierwiastków, np. kobaltu — kwarc niebieski (nie jest spotykany w stanie naturalnym), żelaza — kwarc zielony (podobny do zielonego turmalinu), żelaza i tytanu — kwarc różowy,

- naświetleniu wysokoenergetycznym promieniowaniem zdolnym wytworzyć w materiale syntetycznym barwne centra, np. syntetyczny ametyst,
- traktowaniu obróbką termiczną, np. syntetyczny cytryn.

Kwarc syntetyczny udaje się niekiedy odróżnić od naturalnego na podstawie:

- inkluzji, które w materiale syntetycznym miewają charakter inkluzji dwufazowych lub stałych; te ostatnie mogą przypominać pokrojem okruchy chleba lub główki gwoździ; zupełny brak inkluzji może wskazywać na syntetyczny charakter materiału,
- występowania zarodka, od którego inicjowana była synteza kryształu (nader rzadko spotykana sytuacja),
- wyglądu stref narastania kryształu.

Syntetyczny diament

Syntetyczny diament jest produkowany w postaci:

- pyłu,
- polikrystalicznych agregatów, czyli tzw. carbonado,
- monokryształów.

Otrzymuje się go metodą syntezy w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury. Jego własności fizykochemiczne nie różnią się od analogicznych własności diamentu naturalnego.

Największymi wytwórcami diamentów o przeznaczeniu gemmologicznym i przemysłowym są Stany Zjednoczone, Japonia, Republika Południowej Afryki i Rosja. Wytwórcami diamentów o przeznaczeniu przemysłowym są Chiny. Firma General Electric Co. (Ohio, USA) produkuje syntetyczne diamenty o znaczeniu gemmologicznym o barwach: niebieskiej, szaroniebieskiej, żółtej, intensywnie żółtej, a także bezbarwne. Fabrykanci japońscy (np. Sumimoto Industries Electric, Tomei Diamond Co.) wytwarzają syntetyczne diamenty o barwach: niebieskiej, intensywnie żółtej oraz bezbarwne. W Republice Południowej Afryki produkuje się syntetyczne diamenty barwy: żółtej, intensywnie brunatnożółtej, jasnożółtozielonej (np. w firmie De Beers Laboratoire de Recherches sur le Diamant). W Rosji wytwarzaniem diamentów syntetycznych zajmuje się kilkadziesiąt instytucji.

Największe egzemplarze wysokiej jakości syntetycznych diamentów osiągają obecnie wagę kilkudziesięciu karatów. W 1990 roku laboratorium De Beersa wyprodukowało 34-karatowy egzemplarz. Podstawową masę fabrykatu o przeznaczeniu gemmologicznym stanowią jednak syntetyczne kryształy o wielkości rzędu kilku karatów. Jubilersko wykorzystywane są głównie egzemplarze barwy żółtej i żółtozielonej. Rzadziej spotyka się egzemplarze barwy niebieskiej czy

Syntetyczny diament wyróżniają:

- występowanie inkluzji stałych o pokroju cylindrycznym lub tabliczkowym, połyskujących metalicznie, nieprzezroczystych,
- obecność chmurkowatych, białawych skupisk inkluzji drobnodyspergowanych,
- istnienie bardzo wyrazistych stref narastania o czworokątnym lub sześciokątnym zarysie,
- brak anomalnej dwójłomności, która pospolicie jest spotykana u większości diamentów naturalnych; niektóre syntetyczne diamenty mogą wykazywać między skrzyżowanymi polaroidami swoisty „krzyż” wygaszeń będący widocznym dowodem istnienia naprężeń wewnętrznych w kryształach; „krzyż” wygaszeń geometrycznie jest powiązany z kierunkami czworokątnych lub sześciokątnych stref wzrostu kryształu.

Syntetyczne substytuty diamentu

Od niepamiętnych czasów podejmowano próby tworzenia materiałów imitujących diament. Dopiero jednak w ostatnich kilkudziesięciu latach udało się wytworzyć naprawdę udane naśladownictwa diamentu. Należą do nich:

- **Syntetyczny rutyl** (tlenek tytanu) — barwy żółtej, jasnoniebieskiej, czerwonej, bezbarwny z żółtawym odcieniem — produkowany od końca lat czterdziestych bieżącego stulecia metodą Verneuil’a; znany pod nazwami handlowymi: titania, titania night stone. Wyróżnia go bardzo wysoka dwójłomność (0,287) i dyspersja (0,285—0,363), jest tetragonalny z współczynnikami załamania światła $n_{\omega} = 2,61$ i $n_{\epsilon} = 2,90$. Twardość i gęstość właściwa wynoszą odpowiednio: 5,5 według skali Mohsa i 4,25. Spektroskopowo wyróżnia go wyraźna linia 425,0 nm.
- **Tytanian strontu** (tzw. fabulit) — bezbarwny, krystalizujący w układzie regularnym, produkowany od połowy lat pięćdziesiątych bieżącego stulecia metodą Verneuil’a. Znany też pod handlowymi nazwami: diagem lub starilian. Wyróżnia go współczynnik załamania światła bardzo podobny do diamentu (2,410). Charakteryzuje się dość wysoką dyspersją (0,190), ma jednak dość niską twardość (5,5 wg skali Mohsa) i wysoką gęstość właściwą (5,13—5,15).
- **YAG** („granat” itrowo-glinowy o wzorze $Y_3Al_5O_{12}$). Znany jest pod handlowymi nazwami: diamonair, diamite, diamogem. Bezbarwny. Może być barwiony dodatkiem tlenku chromu, tlenku kobaltu, tlenku tytanu, tlenku manganu (różne odmiany barwne, np.: zielony, żółty, liliowy, fioletowy, niebieski). Krystalizuje w układzie regularnym. Ma wysoką twardość (8,5 według skali Mohsa) i gęstość właściwą (4,55—4,58) oraz relatywnie niezbyt wysoką dyspersję (0,028) i współczynnik załamania światła (1,830). Może

wykazywać żółtą fluorescencję w bliskim nadfiolecie. Początkowo produkowano go metodą *flux-melt*. Obecnie jest wytwarzany także metodą Czochralskiego.

- **GGG** („granat” gadolinowo-galowy o wzorze $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$), bezbarwny. Dodatkiem pierwiastków przejściowych może być niemal dowolnie barwiony (najczęściej na żółtawo, czerwono lub zielono). Krystalizuje w układzie regularnym. Wyróżnia go dość wysoka twardość (7,0—7,5 wg skali Mohsa) i gęstość właściwa (7,02). Współczynnik załamania światła ma — jak na materiał imitujący diament (1,960—1,970) — niezbyt wysoki. Dyspersja wynosi 0,045. W dalekim nadfiolecie wykazuje silną pomarańczową luminescencję, a w bliskim nadfiolecie jest żółty. Spektroskopowo wyróżnia go wyraźne pasmo absorpcji w czerwonym obszarze widma i dwie linie występujące w zielonym i niebieskim odcinku widma. Produkowany metodą Czochralskiego.
- **Kubiczny tlenek cyrkonu (KZ)** zwany pospolicie cyrkonią — o ogólnym wzorze chemicznym $(\text{Zr,Hf})\text{O}_2$. Kubiczny tlenek cyrkonu jest stabilizowany tlenkiem itru Y_2O_3 i tlenkiem wapnia CaO , których zawartość może sięgać nawet 10—15%. Umiejętność stabilizacji struktury kubicznego tlenku cyrkonu znana była już w latach trzydziestych obecnego stulecia, jednak hodowla kryształów kubicznego tlenku cyrkonu na skalę przemysłową stała się możliwa dopiero około 1972 roku po ulepszeniu metody Bridgmana w związku z opracowaniem i wypróbowaniem pomysłu tzw. autotyglu pozwalającego na długotrwałe utrzymywanie bardzo wysokiej temperatury, np. 3000°C. Cyrkonia jest bezbarwna. Przez dodanie tlenku ceru barwi się na żółtopomarańczoworóżowo, przez dodanie tlenku chromu — oliwkowozielono, tlenku kobaltu — liliowo, tlenku miedzi — żółto, tlenku wanadu — zielono, tlenku erbu — różowo. Krystalizuje w układzie regularnym, ma wysoką twardość (8,5 według skali Mohsa) i wyraźną dyspersję (0,060—0,65). Z uwagi na duże podobieństwo własności optycznych cyrkonie uznaje się za materiał bardzo udanie naśladujący diament. Produkowana w Szwajcarii znana jest pod nazwą djevalith ($n = 2,177$ i $d = 5,70$). Produkowana w Rosji znana jest pod nazwą fianit ($n = 2,130$ —2,20 i $d = 6,0$ —10,0). Produkowana w Stanach Zjednoczonych znana jest pod handlowymi nazwami: cubic zirkonia, diamonite, diamondite, shelby, diconia ($n = 2,15$ —2,18 i $d = 5,60$ —5,95).
- **Syntetyczny spinel** o wzorze MgAl_2O_4 zwykle ma barwy: żółtą, zielono-żółtą, zieloną, niebieską, ciemnoniebieską lub jest bezbarwny. Krystalizuje w układzie regularnym. Ma wysoką twardość (8,0 według skali Mohsa), lecz niezbyt wysoki współczynnik załamania światła (1,722—1,727) i dyspersję (0,010—0,020). Gęstość właściwa wynosi 3,59—3,64. Objawia obecność anomalnie plamistego wygaszania światła pod polaryskopem.

5.2.2. Syntetyczne materiały polikrystaliczne

Syntetyczny turkus. Otrzymywany jest w reakcjach między węglanem miedzi, wodorotlenkiem glinu i kwasem fosforowym odbywających się w temperaturze około 1000°C. Uzyskany produkt ma skład chemiczny zbliżony do turkusu naturalnego. Jest to substancja złożona z drobnych kryształków rozmieszczonych w amorficznym tle. Zawartość tła wpływa znacząco na: barwę, gęstość właściwą, twardość, porowatość itp. Istotne różnice między turkusem naturalnym i syntetycznym polegają głównie na:

- niższej gęstości właściwej turkusu syntetycznego wynikającej z większej jego porowatości,
- bledszej barwie turkusu syntetycznego,
- występowaniu igiełkowatych cząstek o niebieskawej barwie rozmieszczonych dość równomiernie w amorficznym, białawym tle.

Procedura wytwarzania syntetycznego turkusu została opracowana i wdrożona przez laboratorium firmy P. Gilsona z Francji.

Syntetyczny lapis-lazuli (lazuryt). W materiale naturalnym dominującym składnikiem jest lazuryt, któremu licznie towarzyszą pokrewne minerały, np.: sodalit, nosean, hauyn, skapolity, mające podobną barwę, twardość, gęstość właściwą, współczynniki załamania światła, skład chemiczny. Występują tam także wtrącenia piryty, chalkopiryty, kalcytu, diopsydu. Syntetyczny lapis-lazuli nie różni się istotnie składem chemicznym i strukturą od materiału naturalnego. Dla stworzenia wrażenia pełniejszego podobieństwa dodawany jest nawet piryt. Materiał syntetyczny, w porównaniu z materiałem naturalnym, charakteryzuje się:

- mniejszą gęstością właściwą,
- mniejszą twardością,
- większą porowatością,
- nieprzezroczystością,
- reakcją z kwasem solnym, podczas której wydziela się przykry zapach siarkowodoru; tego efektu nie ma w reakcji z materiałem naturalnym,
- zanurzony w wodzie na kilkanaście minut nasącza się; powoduje to wzrost gęstości właściwej mimo starannego osuszenia powierzchni obiektu; podwyższona w ten sposób gęstość właściwa może się utrzymywać przez dość długi czas.

Procedura otrzymywania syntetycznego lapis-lazuli została opracowana przez laboratorium firmy P. Gilsona z Francji.

Syntetyczny jadeit. Wyprodukowany został w 1984 roku przez firmę General Electric ze Stanów Zjednoczonych. Surowcami wyjściowymi do produkcji były: pokruszone szkło krzemowe oraz węglan sodu i glinu. Mieszaninę o takim składzie poddano działaniu wysokiego ciśnienia w temperaturze około 221

1400°C. Prace prowadzone nad otrzymywaniem syntetycznego jadeitu miały charakter studialny. Wytworzony jadeit wyróżniał się barwą białą, zieloną, czarną i lawendową.

5.2.3. Syntetyczne materiały amorficzne

Syntetyczny opal. Po rozpoznaniu za pomocą mikroskopu elektronowego mikrogranularnej struktury opalu szlachetnego nasiliły się próby zmierzające do otrzymania syntetycznego opalu o walorach estetycznych opalu szlachetnego. Pierwsze odniosło sukces laboratorium firmy P. Gilsona (Francja), które w 1974 roku wyprodukowało opal biały i czarny o walorach estetycznych bliskich opalowi szlachetnemu. Od naturalnego opalu szlachetnego różnił się on nieco mniejszą twardością (4,5 według skali Mohsa), większą porowatością i niższą gęstością właściwą. Różniły go także pewne efekty optyczne, np. nieco większa przejrzystość oraz występowanie tzw. jaszczurczej skórki.

Od końca lat siedemdziesiątych na rynku światowym zaczęły się pojawiać syntetyczne opale szlachetne produkowane w Rosji i na Ukrainie. Z ich produkcją eksperymentowano w: Instytucie Geologii i Geofizyki Syberyjskiego Oddziału Akademii Nauk, Lwowskim Biurze Technologiczno-Konstrukcyjnym Przemysłu Jubilerskiego, Petersburskim Instytucie Technologicznym oraz w Instytucie Syntezy Materiałów Mineralnych w Aleksandrowie koło Włodimira. Prace nad wyprodukowaniem syntetycznego opalu szlachetnego prowadzi się intensywnie również w Japonii, Australii, Wielkiej Brytanii i w Stanach Zjednoczonych.

Szkło. Mianem tym określa się substancje, których stop w wyniku szybkiego ochłodzenia przechodzi w stan, w którym jego lepkość staje się większa niż 10¹⁴ pauzów. Zeszklwione substancje mają wiele właściwości fizycznych ciała stałego. Szkło jest materiałem pozostającym w zasadniczej swej części w stanie amorficznym. Budowa szkła nie została jeszcze ostatecznie wyjaśniona. Najczęściej uważa się, że jest to przechłodzona ciecz o strukturze uporządkowanej w bliskim zasięgu, tj. do 10—6 μm. Stan szklisty jest termodynamicznie nietrwały i wykazuje tendencję do powolnych zmian (tzw. dewitryfikacji). W ich rezultacie szkło przekształca się z czasem w polikrystaliczne tworzywo. W temperaturze pokojowej proces dewitryfikacji jest bardzo powolny i trwa setki lat.

Szkło jest głównie produktem syntetycznym, ale występuje i powstaje również w warunkach naturalnych, np. obsydian, smołowiec, lechatelieryt, tektyt.

Szkło syntetyczne wykorzystuje się do naśladowania wielu naturalnych materiałów gemmologicznych. Imitacje wykonane ze szkła są nazywane popularnie przez gemmologów „pastami”.

W związku z tym wpływa się na jego:

- barwę — przez zastosowanie dodatków barwiących, np. selenu — barwa czerwona, złota — barwa czerwona, neodymu — różowoliliowa, kadmu — barwa pomarańczowa do żółtej, tytanu — barwa żółta, uranu — barwa żółtozielona, chromu — barwa zielona, żelaza — barwa niebieskozielona, żółtozielona, brąnatnoczerwona, kobaltu — barwa niebieska, manganu — barwa fioletowopurpurowa do nieprzezroczystej,
- gęstość właściwą, która może się zmieniać od 2,07 (szkło opalizujące) do 4,16 (szkło ołowiowe — flint),
- współczynnik załamania światła, który może mieć wartości od 1,440 (szkło opalizujące) do 1,680 (szkło ołowiowe — flint),
- twardość, która może dochodzić do 7,0—7,5 według skali Mohsa,
- widmo absorpcji światła widzialnego,
- fluorescencję,
- izotropię optyczną przez wywołanie anomalnej anizotropii, pleochroizmu, itp.

W celu naśladowania naturalnych materiałów gemmologicznych najczęściej wykorzystuje się różne gatunki szkła ołowiowego, np. „flint” (mieszanina tlenku potasu, tlenku sodu i tlenku ołowiu), „strass” (mieszanina 35% obj. krzemionki, 10% obj. węglanu potasu i przeszło 50% obj. tlenku ołowiu), oraz szkło tytanowo-żelazowe, borokrzemianowe, wapniowo-żelazowe, wapniowe, berylowe, potasowe, np. „crown” (mieszanina krzemionki, tlenku sodu i tlenku potasu oraz wapnia z tlenkami barwiącymi, np. żelaza, tytanu, kobaltu, chromu).

Szkło awenturynowe, tworzone dodatkiem inkluzji przypominających do złudzenia inkluzje naturalne czy też opalizujące, warstewkowane szkło Słokuma lub spieki włókien różnych gatunków szkła ołowiowego i potasowego tworzone celem uzyskania efektu kociego oka lub kamienia księżycowego, wykorzystywane są nagminnie do naśladowania barwnych zjawisk optycznych spotykanych w niektórych materiałach naturalnych. Spotyka się także szklane, wielobarwne imitacje agatu (tzw. kule agatowe).

Imitacje ze szkła wyróżniają się:

- uczuciem ciepła przy dotyku,
- niską twardością, która powoduje, że krawędzie fasetek obserwowane lupowo lub binokularnie ujawniają obecność drobnych uszkodzeń z odpryskami o charakterystycznie muszlowym przełamie,
- obecnością widocznych binokularnie banieczkowatych i pęcherzykowatych inkluzji,
- obecnością widocznych binokularnie tzw. warstewek wirowych przypominających wyglądem strużki syropu,
- częstym występowaniem anomalnej dwójłomności widocznej pod polaryskopem w postaci smugi świetlnej, spirali lub litery X.

6. Metody traktowania (poprawiania) materiałów gemmologicznych

Traktowanie materiałów gemmologicznych znane było już od zarania dziejów. Zarówno dawniej, jak i współcześnie celem traktowania jest makroskopowo zauważalne polepszenie walorów estetycznych poprawianego materiału przez wpływanie na jego konstytucyjne własności, jak barwę, przezroczystość, spoistość, stopień krystaliczności lub poprzez maskowanie czy usuwanie naturalnych jego niedoskonałości, np. otwartych inkluzji, niektórych wtrąceń, rys, łupliwości, pęknięć, czy też ubytków powstałych w czasie eksploatacji obiektu gemmologicznego, np. wykruszeń.

Wyróżnia się traktowanie (poprawianie):

- **pasywne**, obejmujące metody nie działające modyfikująco na materię obiektu gemmologicznego,
- **aktywne**, obejmujące metody działające modyfikująco na materię obiektu gemmologicznego.

W grupie pasywnych metod traktowania materiałów gemmologicznych należy umieścić:

● *Barwienie pasywne*, które może polegać na powlekanii powierzchni obiektu gemmologicznego barwnikiem (barwienie powierzchniowe) lub na nasycaniu barwnikiem jego wnętrza (barwienie węgłne). Realizuje się to dzięki stosowaniu różnorodnych kąpeli barwiących lub napełnianiu przestrzeni otwartych ku powierzchni obiektu substancją barwiącą. Procesy te przebiegają bez reakcji chemicznej z materią obiektu barwionego. Zadaniem kąpeli barwiących jest wzmocnienie już istniejącej barwy lub wytworzenie nowej przez osadzenie we wnętrzu obiektu niektórych składników kąpeli. Zabiegi takie stosuje się względem materiałów porowatych (turkus, lapis-lazuli, agat, chalcedon). Zadaniem nasączania wolnych przestrzeni w obiekcie gemmologicznym jest wzmocnienie barwy. W tym celu stosuje się nasączanie barwnymi olejami lub barwnymi

● *Konsolidację*, która polega bądź na impregnacji substancją wiążącą, np. plastikiem, żywicą, bądź na sprasowaniu mniejszych okruchów w większą bryłę jednolitego materiału. Proces ten przeważnie jest prowadzony w warunkach podwyższonej temperatury.

● *Maskowanie i zabliznianie* defektów, uszkodzeń i niedostatków obiektów gemmologicznych przez wypełnienie ich tworzywami ceramicznymi lub szkłem — np. pęknięć, szczelinek łupliwości, otwartych inkluzji fluidalnych, uszkodzeń mechanicznych.

W grupie aktywnych metod traktowania materiałów gemmologicznych należy umieścić obróbkę:

- *Termiczną*, która może się odbywać w różnych zakresach temperatury, w atmosferze utleniającej, w atmosferze obojętnej lub w atmosferze redukcyjnej, a wytworzony tym sposobem produkt może zachowywać trwale lub nietrwale nabyte prażeniem właściwości, np. barwę, przezroczystość.
- *Przez napromieniowanie*, która może polegać na naświetlaniu promieniowaniem rentgenowskim, α , β , γ , neutronowym, protonowym, elektronowym lub wiązką światła laserowego; traktowane w taki sposób materiały w następstwie mogą charakteryzować się promieniotwórczością nabytą.
- *Chemiczną*, która polega na reakcji chemicznej materii obiektu gemmologicznego z oddziałującymi na niego substancjami chemicznymi; prowadzi to do trwałej zmiany niektórych własności obiektu gemmologicznego, np. barwy; zasięg głębiny takiej zmiany bywa różny.
- *Kombinowaną*, która polega na zastosowaniu kilku następujących po sobie metod traktowania użytych w określonym porządku i w określonych warunkach progowych, np. napromieniowanie + ogrzewanie, obróbka chemiczna + ogrzewanie.

6.1. Obróbka termiczna

Obróbkę termiczną stosowano od dawna w celu polepszenia barwy i przezroczystości niektórych materiałów (np. korundu). Jednak dopiero ostatnie kilkadziesiąt lat umożliwiło pełniejsze zrozumienie istoty przemian zachodzących w niektórych kryształach pod wpływem podwyższonej temperatury.

Czynnikami mającymi największy wpływ na przebieg i wynik obróbki termicznej materiału gemmologicznego są:

- maksymalna temperatura osiągnięta podczas wygrzewania,
- czas utrzymywania maksymalnej temperatury prażenia,
- czas i sposób dochodzenia do maksymalnej temperatury obróbki,
- czas chłodzenia obiektu, etapy chłodzenia i ich przebieg,
- natura chemiczna atmosfery stosowanej w czasie prażenia, np. utleniająca, redukcyjna, inerta chemicznie,

- ciśnienie panujące podczas wygrzewania obiektu,
- skład i natura chemiczna pierwiastków pozostających w kontakcie z wypraząnym obiektem.

Szczegółowe procedury, a także warunki obróbki termicznej obiektów i materiałów gemmologicznych rzadko są szerzej upowszechnione. Wynika to z dwóch zasadniczych powodów:

- ① szczegółowe warunki większości procedur są pilnie strzeżoną tajemnicą zawodową producentów,
- ② tego samego rodzaju materiały pochodzące z różnych źródeł wymagają indywidualnie dostosowanych procedur traktowania.

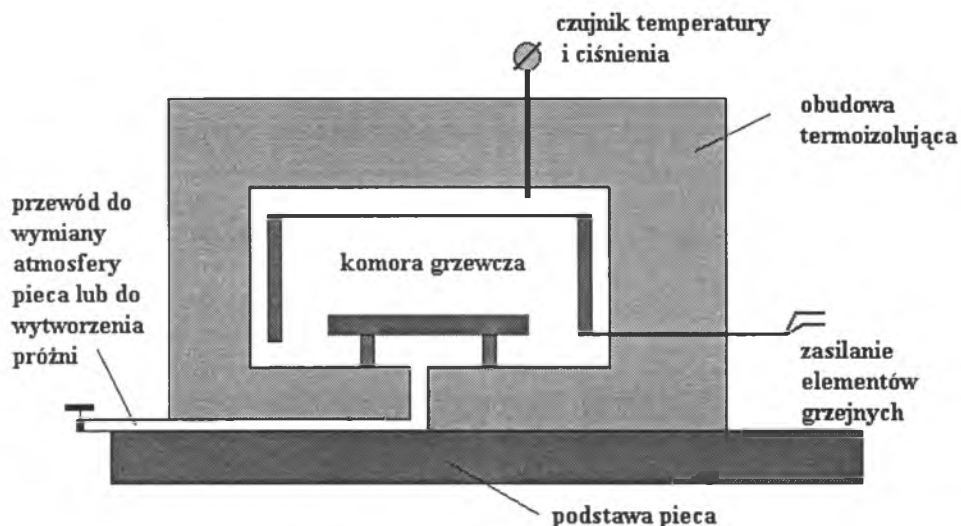
Obróbka termiczna materiału gemmologicznego najczęściej może powodować:

- ściemnianie wskutek utlenienia i/lub lekkiego uwęglenia, np. w bursztynie, w kości słoniowej,
- rozjaśnienie wskutek bardzo powolnego ogrzewania i studzenia, często w warunkach podwyższonego ciśnienia, co umożliwia uwolnienie inkluzji gazowych zamkniętych uprzednio w materiale, np. w bursztynie,
- zmianę barwy wskutek: destrukcji centrów barwnych (np. topaz niebieski w ten sposób przechodzi w topaz bezbarwny), zmiany stopnia utlenienia przez dyfuzję tlenu do wnętrza materiału (np. szafir bezbarwny przekształca się tym sposobem w szafir niebieski), zmiany stopnia uwodnienia i agregacji składników obiektu (np. karneol tym sposobem przekształca się w materiał barwy brunatnej lub pomarańczowej),
- wzmocnienie barwy wskutek pobudzonej termicznie dyfuzji niektórych pierwiastków — np. szafir niebieski,
- wytworzenie zjawiska optycznego przez termiczne rozpuszczenie lub wytrącenie nowej fazy — np. asteryzmu w szafirze, likwidacja niektórych inkluzji,
- modyfikację struktury wskutek jej odbudowy — np. malakon można termicznie odbudować do cyrkonu,
- wytworzenie mikrospeków w wyniku gwałtownego przechłodzenia nagrzanego materiału — np. w kwarcu, w szafirze.

Obróbka termiczna materiałów i obiektów gemmologicznych realizowana jest poprzez:

● **Ogrzewanie w piecu.** Powoduje ono modyfikację połączeń i rozmieszczenia atomów w materiale. Obróbkę prowadzi się w różnych zakresach temperatury zawartych w przedziale 300—2200°C. Obróbka może trwać od kilku sekund do wielu tygodni. Może być prowadzona za pomocą prostych pieców opalanych drewnem lub węglem drzewnym, jak również wyspecjalizowanych pieców elektrycznych (rys. 188). Cel takiej obróbki stanowi wzmocnienie istniejącej barwy,

226 nadanie nowej barwy lub trwałe wytworzenie atrakcyjnych zjawisk optycznych.



Rys. 188. Piec do obróbki termicznej

Zmiany te mogą obejmować cały obiekt lub dotyczyć tylko przypowierzchniowej warstwy materiału, między innymi wskutek powierzchniowej dyfuzji. Podczas prowadzenia procesu termicznego istnieje duże ryzyko wytworzenia się spękań lub nawet rozerwania obiektu na części. Obróbce przez nagrzewanie poddawane są: często — bursztyn, kwarc (cytryn), korund (rubin, szafir), zoizyt (tanzanit), turmalin, cyrkon; okazjonalnie — kwarc (ametyst), diament, beryl (szmaragd, akwamaryn, goszenit), spodumen (hiddenit, kunzyt), spinel, topaz, oliwin; sporadycznie — andaluzyt, chryzoberyl (aleksandryt), opal, jadeit, kordieryt.

Zmiany nabyte podczas omawianej obróbki są: trwałe — w chryzoberylu (aleksandrycie), bursztynie, kwarcu (ametyście, cytrynie), andaluzycie, diamentcie, korundzie (rubinie, szafirze), zoizycie (tanzanicie), turmalinie, cyrkonie, kordierycie; o różnej trwałości — w berylu (goszenicie), spodumencie (hiddenicie), spinelu, topazie; nietrwałe — w spodumencie (kunzycie), opalu, jadeicie, berylu (szmaragdzie).

● **Ogrzewanie wiązki laserowej.** Zasadniczym celem tej procedury jest modyfikacja barwy obiektu lub materiału gemmologicznego. Za pomocą tej techniki można uzyskać także różne barwy w tym samym obiekcie. Przykładem może być wielobarwny kwarc. Użycie systemu luster pozwala skoncentrować światło laserowe w wybranym punkcie traktowanego obiektu i precyzyjnie prowadzić proces wygrzewania zarówno co do temperatury, aż do 2700°C , jak i w różnie umiejscowionych i o różnej wielkości obszarach nagrzewania. Techniki tej użyto dotychczas z trwałym rezultatem dla modyfikacji barwy w kwarcu (ametyst, cytryn), korundzie (rubin, szafir), spinelu, topazie, turmalinie i cyrkonie.

6.2. Obróbka napromieniowaniem

Naturalnymi źródłami wysokoenergetycznego promieniowania są pierwiastki radioaktywne powstałe podczas formowania się Układu Słonecznego. Niektóre z nich, mimo upływu kilku miliardów lat, występują jeszcze w skorupie ziemskiej w znaczącej ilości, gdyż ich okres połowicznego rozpadu jest bardzo długi. Jako naturalne źródła wysokoenergetycznego promieniowania największe znaczenie mają: uran, tor, rad, radon oraz radioaktywne izotopy niektórych innych pierwiastków, np. potasu (izotop K^{40}). Źródłem wysokoenergetycznego promieniowania jest także stale docierające do Ziemi promieniowanie kosmiczne. Wszystko to powoduje, że większość naturalnych materiałów gemmologicznych zawdzięcza swoją barwę napromieniowaniu naturalnemu powstałemu w dostatecznie długich odcinkach czasu geologicznego.

Niektóre z materiałów naturalnych mogą się wyróżniać szczególnie dużą zawartością pierwiastków promieniotwórczych. Na przykład cyrkon może zawierać nawet kilka procent pierwiastków promieniotwórczych wbudowanych w jego strukturę (do 10% toru, do 2% uranu), zdolnych dokonać całkowitej destrukcji sieci krystalicznej zawierającego go kryształu, powstającym podczas ich rozpadu promieniowaniem α oraz β i przekształcić go w materiał amorficzny (tzw. malakon). Jednak zwykle proces destrukcji cyrkonu nie jest tak daleko posunięty i ogranicza się do przemian wyrażających się modyfikacją barwy kryształu.

Obróbka napromieniowaniem polegająca na ekspozycji traktowanego materiału na działanie różnych źródeł wysokoenergetycznej radiacji jest w pewnym stopniu naśladowaniem procesu naturalnego. W tym celu używa się źródeł wysokoenergetycznych:

- fal elektromagnetycznych, np. ultrafioletu, promieniowania rentgenowskiego, promieniowania γ ,
- cząstek naładowanych ujemnie, np. elektronów,
- cząstek naładowanych dodatnio, np. protonów, cząstek α ,
- cząstek elektrycznie obojętnych, np. neutronów.

Każde z tych źródeł ma swoje zalety i wady. Na przykład źródła emitujące wysokoenergetyczne cząstki powodują wytworzenie się w napromieniowanym materiale radioaktywności potomnej, która może się utrzymywać przez dość długi czas na poziomie przekraczającym dopuszczalne, bezpieczne dla żywych organizmów normy. W związku z tym obiekty napromieniowane podlegają tzw. studzeniu, którego czas jest różny i zależy od czasu połowicznego rozpadu wytworzonych izotopów. Nie można ustalić ogólnych reguł postępowania z obiektami napromieniowanymi celem ich „studzenia”, gdyż poziom radiacji potomnej w dużym stopniu zależy od zanieczyszczeń chemicznych (wtrąceń) zawartych w traktowanym obiekcie. Ich obecność może znacząco przedłużyć czas „studzenia”. Jeśli obiekt jest chemicznie czysty, to może być często

gdy inne obiekty tego samego rodzaju mogą być „niebezpieczne” jeszcze w wiele lat po napromieniowaniu. W związku z tym każdy obiekt napromieniony powinien być traktowany indywidualnie.

Celem obróbki przez napromieniowanie jest:

- wytworzenie w napromieniowanym obiekcie określonej, atrakcyjnej estetycznie barwy,
- stabilizacja istniejącej już barwy, nietrwałej przed napromieniowaniem obiektu,
- odnowienie uprzedniej barwy obiektu,
- zastąpienie jednej barwy obiektu inną.

Napromieniowanie powoduje modyfikację barwy napromieniowanego materiału przez przemieszczenie elektronów lub atomów i kreację, lub modyfikację uprzednio już istniejących centrów barwnych.

Napromieniowanie polega na ekspozycji obiektu lub materiału gemmologicznego na działanie:

● **Cząstek α .** Proces ten jest prowadzony w akceleratorach cząstek, np. w cyklotronach, synchrotronach. Zakres penetracji akcelеровanych cząstek w głąb traktowanego materiału zależy od wielu czynników, z których największe znaczenie mają: wielkość traktowanego obiektu, jego struktura atomowa i energia bombardujących cząstek. Zależnie od zastosowanego źródła cząstek α obserwuje się silniejsze lub słabsze ślady radioaktywności potomnej w napromieniowanym obiekcie. Ogrzanie lub naświetlenie światłem widzialnym czy ultrafioletem może skutkować zmniejszeniem się radioaktywności potomnej w obiekcie uprzednio napromieniowanym cząstkami α . Wynik modyfikacji barwy przez napromieniowanie cząstkami α jest niezbyt wysokiej jakości, gdyż ich oddziaływanie ogranicza się zwykle do przypowierzchniowej warstewki obiektu i jest nierównomiernie rozłożone. Takiej obróbce poddawany bywa okazjonalnie: beryl (goszenit); sporadycznie: korund (rubin, szafir), diament, kwarc (ametyst, cytryn), topaz, turmalin, cyrkon, chryzoberyl (aleksandryt), beryl (akwamaryn) oraz perły naturalne i hodowane.

Wynik napromieniowania cechuje się zróżnicowaną trwałością: od umiarkowanej do dobrej.

● **Cząstek β .** Proces jest prowadzony w akceleratorach cząstek, np. w beta-tronach, akceleratorach liniowych. Obróbka taka obejmuje zwykle przypowierzchniową warstwę obiektu. Głębokość penetracji cząstek β , a tym samym grubość zmodyfikowanej warstwy obiektu, zależy od ich energii uzyskanej w akceleratorze, ale także od rodzaju szlif nałożonego na obiekt napromieniowywany oraz od jego struktury. Podczas naświetlania cząstkami β wyzwala się dużo ciepła i napromieniowywany obiekt musi być chłodzony np. wodą, aby uniknąć pęknięcia. Obiekt naświetlony cząstkami β może wykazywać ślady radioaktywności potomnej. Można ją zmniejszyć przez nagrzewanie lub wystawienie na działanie ultrafioletu lub światła widzialnego. Barwa uzyskana naświetlaniem cząstkami β charakteryzuje się różną trwałością w poszczególnych obiektach

— od dobrej do złej. Tym sposobem traktowany jest: często — diament, korund (szafir); okazjonalnie — kwarc (ametyst), beryl (goszenit), spodumen (kunzyt), topaz, cyrkon; sporadycznie — beryl (akwamaryn), chryzoberyl (aleksandryt), korund (rubin), turmalin oraz perły naturalne i hodowane.

● **Promieniowanie γ .** Wynik traktowania zależy od: struktury atomowej traktowanego materiału, typu szlifu nałożonego na napromieniowywany obiekt i energii użytego promieniowania. Źródłem promieniowania γ są izotopy promieniotwórcze różnych pierwiastków. Energia promieniowania γ zależy od rodzaju użytego izotopu. W tego rodzaju procedurach najczęściej używa się izotopu kobaltu Co^{60} , którego okres połowicznego rozpadu trwa 5,3 roku. Izotop ten jest powszechnie użytkowany w instalacjach przemysłowych w celu konserwacji żywności, sterylizacji materiałów medycznych, w produkcji różnych materiałów, stąd duża dostępność tego rodzaju źródeł promieniowania i łatwość wykorzystania ich do traktowania obiektów i materiałów gemmologicznych. Jakość uzyskiwanej tym sposobem barwy jest przeważnie dość dobra, gdyż penetracja promieniowaniem γ ma większy zasięg, a jego rozkład jest bardziej równomierny. Jednocześnie ten sposób traktowania nie pociąga za sobą wzrostu temperatury obrabianego obiektu. Zastosowanie w następnej fazie obróbki termicznej może cofnąć uzyskany napromieniowaniem rezultat. Obiekty napromieniowane tym sposobem wykazują zwykle śladową radioaktywność potomną. Promieniowaniem γ są traktowane: często — topaz; okazjonalnie — beryl (goszenit); sporadycznie — cyrkon, turmalin, korund (szafir, rubin), oliwin, diament, chryzoberyl (aleksandryt), granat (grossular-tsaworyt), kwarc (ametyst), beryl (akwamaryn) oraz perły naturalne i hodowane.

Trwałe wyniki takiego traktowania obserwuje się w chryzoberylu (aleksandrycie), nietrwałe w granacie (grossularze-tsaworycie), a o różnej trwałości w pozostałych materiałach.

● **Protonów i neutronów.** Zabieg taki wykonuje się w akceleratorach cząstek, np. w cyklotronach, synchrotronach, akceleratorach liniowych — z wykorzystaniem protonów i w reaktorach atomowych — z użyciem neutronów; energia używanych w takim celu protonów i neutronów jest około tysiąc razy większa od energii wykorzystywanych w takim samym celu cząstek α i β . Użycie protonów i neutronów do naświetlania materiału gemmologicznego powoduje wytworzenie silnej radioaktywności potomnej w napromieniowanym materiale; penetracja protonów i neutronów w materiał zależy od wielu czynników, z których największe znaczenie ma rodzaj nałożonego szlifu, struktura atomowa naświetlanego obiektu oraz energia użytych cząstek; barwa uzyskana tym sposobem jest jednolita; rezultat otrzymany takim traktowaniem jest w mniejszym stopniu odwracalny nagrzewaniem lub przez naświetlanie niskoenerygetycznym promieniowaniem niż rezultaty innych sposobów napromieniowania. Podczas napromieniowywania wyzwala się ciepło. Działaniu protonów i neutronów poddaje się: często — diament i topaz; okazjonalnie — korund (szafir) i turmalin; sporadycznie — beryl (goszenit, szmaragd, akwamaryn),

230 korund (rubin), chryzoberyl (aleksandryt), kwarc (ametyst), spodumen.

● **Promieniowania rentgenowskiego.** Instalacje wytwarzające promieniowanie rentgenowskie są łatwo dostępne i można je spotkać w użytkowaniu zarówno przemysłowym, jak i medycznym. Promieniowanie rentgenowskie uzyskuje się, bombardując przyspieszonymi elektronami jądra ciężkich pierwiastków, np. wolframu, chromu, molibdenu. Penetracja promieniowania rentgenowskiego w naświetlany materiał lub obiekt zależy od mocy instalacji wytwarzającej promieniowanie (150 KeV—25 MeV), rodzaju szlifu nałożonego na obiekt oraz od jego struktury atomowej. Działanie promieniowania rentgenowskiego może prowadzić do wytworzenia się radioaktywności potomnej w naświetlonym obiekcie. Rezultat otrzymywany tą procedurą może być cofnięty przez wygrzewanie lub przez naświetlanie niskoenergetycznym promieniowaniem elektromagnetycznym, np. ultrafioletem, światłem widzialnym; tego rodzaju obróbce poddaje się: często — perły naturalne i hodowane; okazjonalnie — topaz, korund (szafir), beryl (goszenit, akwamaryn); sporadycznie — cyrkon, turmalin, korund (rubin), beryl (szmaragd), chryzoberyl (aleksandryt), diament, bursztyn, kwarc (cytryn).

Trwały wynik takiego traktowania uzyskuje się jedynie w bursztynie, sporadycznie również w perłach i berylu (akwamaryn, goszenit), w pozostałych materiałach rezultat jest nietrwały i niskiej jakości.

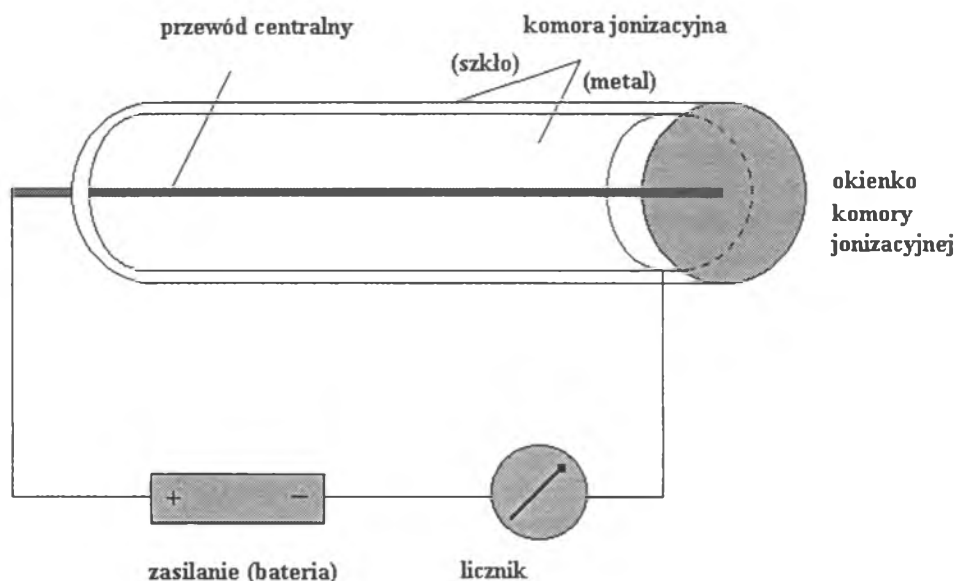
● **Naturalnych pierwiastków radioaktywnych,** np. uranu, radu. Ten typ procedury najbardziej przypomina procesy napromieniowania zachodzące w warunkach naturalnych. Naświetlany obiekt jest bowiem zanurzany na pewien czas bezpośrednio w soli pierwiastka promieniotwórczego. Produktem takiego napromieniowania jest znaczące przemieszczenie się niektórych atomów w sieci krystalicznej naświetlanego materiału w stosunku do ich pierwotnego położenia — następuje modyfikacja barwy. Obiekty poddane takiej procedurze zawsze wykazują radioaktywność potomną. Tak uzyskaną barwę można cofnąć przez wygrzewanie. Współcześnie takiemu traktowaniu poddaje się materiały i obiekty gemmologiczne bardzo rzadko. Stosowano je głównie w przeszłości, lecz obiekty naświetlone tym sposobem spotyka się jeszcze w obrocie rynkowym. Za pomocą naturalnych pierwiastków radioaktywnych traktowano: cyrkon, topaz, korund (rubin, szafir), diament, beryl (szmaragd, akwamaryn), chryzoberyl (aleksandryt), kwarc (ametyst, cytryn), opal, granat (andradyt-demantoid), andaluzyt, bursztyn.

Trwały wynik traktowania obserwowano w topazie, korundzie (szafir, rubin), opalu, diamencie, bursztynie, granacie (andradyt-demantoid). W pozostałych materiałach wynik był niskiej jakości i niskiej trwałości.

6.2.1. Pomiar radioaktywności (licznik Geigera)

Najbardziej rozpowszechnionym i znanym przyrządem służącym do detekcji i pomiaru radioaktywności jest licznik Geigera (licznik Geigera-Müllera). Jest to jeden z liczników jonizacyjnych. Składa się z komory jonizacyjnej wypełnionej

gazem o niskim ciśnieniu. Komora jonizacyjna ma okienko umożliwiające przenikanie promieniowania do jej wnętrza (rys. 189). Przewód umieszczony centralnie w komorze jonizacyjnej utrzymywany jest stale pod napięciem dzięki autonomicznemu zasilaniu. Gdy zjonizowana cząsteczka lub elektron, porcja promieniowania rentgenowskiego czy też promieniowania γ przeniknie do komory jonizacyjnej przez jej okienko i zjonizuje zawarty tam gaz, w następstwie rozwija się mikrowyładowanie elektryczne i przepływ prądu elektrycznego pomiędzy centralnie umieszczonym przewodem i ściankami komory jonizacyjnej. Fakt ten jest rejestrowany wychyleniem się wskazówki licznika pomiarowego, a dźwiękowo sygnalizuje go wzmocniony mikrofonem trzask.

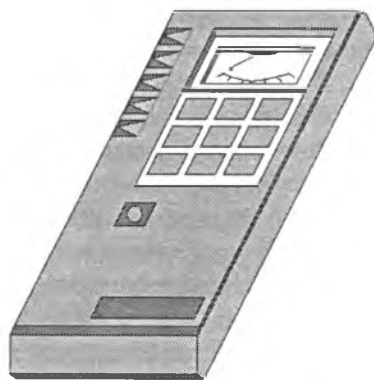


Rys. 189. Licznik Geigera (wg Nassaua, 1980)

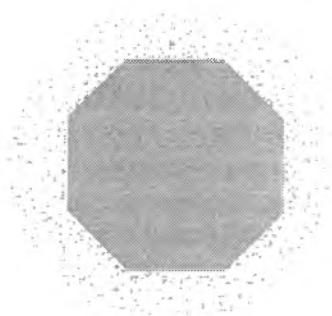
Licznika Geigera używa się głównie do wykrywania cząstek β (elektronów) i promieniowania γ . Jeśli metalowy ekran umieści się na okienku komory jonizacyjnej licznika, to elektrony będą absorbowane, a licznik zarejestruje jedynie oddziaływanie promieniowania γ . Cięższe cząstki, np. protony, cząstki α są całkowicie absorbowane przez materiał okienka komory jonizacyjnej i aby je rejestrować, trzeba się odwoływać do bardziej wyrafinowanych technik pomiarowych. Licznik Geigera nie jest w stanie zarejestrować również promieniowania neutronowego.

Dla pomiaru radioaktywności o niskim natężeniu, czyli takiego, jakie zwykle występuje w napromieniowanych materiałach i obiektach gemmologicznych, opracowano kilka wariantów licznika Geigera. Jednym z najbardziej znanych

i rozpowszechnionych jest licznik znany pod nazwą *Tru-check* (rys. 190). Jest on przydatny zarówno w użytkowaniu amatorskim, jak i profesjonalnym. Jego głównym przeznaczeniem jest ostrzeganie przed ewentualnym zagrożeniem radiacją ze strony napromieniowanego obiektu lub materiału gemmologicznego. Istnieją również inne typy mierników promieniowania radioaktywnego o charakterze przyrządów kieszonkowych. Ich zasada działania opiera się na detekcji promieniowania przez kryształ lub półprzewodnik, przy czym te ostatnie są w stanie mierzyć wszystkie rodzaje promieniowania, również w warunkach bardzo wysokiego jego natężenia. Jednak dla detekcji promieniowania emitowanego przez naświetlone obiekty i materiały gemmologiczne wystarczający jest jeden z kieszonkowych, atestowanych modeli licznika Geigera-Müllera.



Rys. 190. Licznik Geigera „Tru-check”



Rys. 191. Autoradiografia obiektu radioaktywnego (na kliszy fotograficznej) (wg Andersona, 1980)

Dobrym i czułym testerem radioaktywności jest błona fotograficzna. Stopień jej zaczernienia odniesiony do czasu oddziaływania promieniowania jest doskonałym świadectwem ilości i natężenia pochłoniętego promieniowania. Błona fotograficzna bywa stosowana do testowania większych partii obiektów gemmologicznych, szczególnie tych wydzielających słabe promieniowanie (tzw. audioradiografia). Procedura testowania radioaktywności polega na pozostawieniu badanego obiektu w kontakcie z błoną fotograficzną w warunkach zupełnej ciemni. Czas testowania powinien być tym dłuższy, im słabsze promieniowanie wykazuje testowany obiekt. Zwykle jest to kilka godzin, kilka dni lub nawet kilka tygodni. W rezultacie, po wywołaniu błony fotograficznej, powstaje rodzaj audioradiograficznej „fotografii” testowanego obiektu (rys. 191). Warto zaznaczyć, że ze wszystkich rodzajów promieniowania najslabszy efekt na błonach fotograficznych pozostawia promieniowanie gamma.

6.3. Obróbka chemiczna

Obróbkę chemiczną stosuje się dość często jako czynność poprzedzającą i przygotowującą dla innych rodzajów obróbki, np. termicznej, powierzchniowej i przypowierzchniowej. Polega ona zwykle na chemicznym działaniu:

- kwasów, np. kwasu solnego, wody królewskiej,
- zasad, np. zasady sodowej, zasady potasowej,
- silnych utleniaczy bądź reduktorów, np. wody utlenionej, perhydrolu,
- związków o specyficznych właściwościach, np. wykazujących reakcję fotochemiczną, o własnościach wybielających.

Działanie chemiczne zmierza zwykle do usunięcia plam barwnych, całkowitego wybielenia lub uzyskania określonej barwy. Na przykład perły są wybielane wodą utlenioną, a barwione na szaro lub czarno — azotanem srebra. Obróbka chemiczna może być stosowana do wszystkich materiałów gemmologicznych, lecz szczególnie zachęcające rezultaty uzyskuje się w obróbce chemicznej materiałów pochodzenia organicznego (np. pereł, bursztynu, koralu, szylkretu), a także materiałów amorficznych i polikrystalicznych (np. jadeitu, opalu, chalcedonu).

6.4. Obróbka powierzchniowa i przypowierzchniowa

Zadaniem obróbki powierzchniowej jest:

- waloryzacja barwy obiektu gemmologicznego,
- zamaskowanie wszelkich niedostatków obiektu gemmologicznego, np. pęknięć, wykruszeń, rys łupliwości, otwartych inkluzji,
- konsolidacja i utwardzenie powierzchniowej i przypowierzchniowej warstwy obiektu gemmologicznego.

Zadania te mogą być realizowane:

- jednocześnie, przez zastosowanie tylko jednej techniki traktowania, która powoduje równoczesną waloryzację barwy obiektu, jego konsolidację oraz maskowanie wszelkich ubytków i niejednorodności występujących w obiekcie,
- kolejno, przez zastosowanie kilku technik następujących po sobie w określonym porządku, z których każda wpływa tylko na jedną z właściwości obiektu.

Do najczęściej stosowanych technik obróbki powierzchniowej i przypowierzchniowej należą: wypełnianie, powleczenie i modyfikacja.

A. Wypełnianie wolnych przestrzeni w obiekcie — pęknięć, wykruszeń, otwartych inkluzji, szczelin. Należą tu:

- Żywice epoksydowe, których współczynnik załamania światła jest bliski traktowanemu materiałowi i pozwala zamaskować dokonane wypełnienie dzięki doborowi odpowiedniej barwy wypełniacza, tym samym barwa traktowanego obiektu może zostać zintensyfikowana. Również twardość takich żywic jest znaczna i może wynosić nawet 3,5—4,5 według skali Mohsa. Są one odporne na dość wysokie temperatury (do 260°C), napromieniowanie, oraz na działanie

sydową możliwe jest stosowanie jeszcze wielu innych technik traktowania. Zasadniczą wadą żywic epoksydowych jest ich krystalizacja. Jest to często powód wzrostu ich objętości, a tym samym wytworzenia się naprężeń w traktowanym żywicy materiale. Powoduje też wzrost kruchości takiego obiektu i może prowadzić do jego pęknięcia lub wykruszeń. Żywice epoksydowe stosuje się: c z ę s t o — w diamencie, berylu (szmaragd), o k a z j o n a l n i e — w chryzoberylu, opalu, korundzie (szafir, rubin), berylu (goszenit), s p o r a d y c z n i e — w jadeicie, perłach, spinelu, zoizycie (tanzanie), topazie i turmalinie.

Otrzymywany wynik traktowania jest zawsze trudny do przewidzenia, a bardzo rzadko jest naprawdę zadowalającej jakości i trwałości.

● Szkło, którego współczynnik załamania światła i barwa są dostosowywane do właściwości wypełnianego obiektu. Celem takiego zabiegu jest likwidacja drobnych pustek po otwartych do powierzchni inkluzjach fluidalnych. Technika ta jest stosowana dość często w traktowaniu diamentów i korundów (rubinu, szafiru). Bywa stosowana także względem chryzoberylu (aleksandryt), spinelu, topazu, cyrkonu, oliwinu i jadeitu. Na ogół daje zadowalający rezultat o dużej trwałości; tylko w topazie, oliwinie, diamencie i jadeicie wynik traktowania szkłem może być nieprzewidywalny i nietrwały.

● Ciecze i żele, które są dobierane i barwione w taki sposób, by jak najmniej różniły się od wypełnionego materiału. Niekiedy są one barwione w ten sposób, by modyfikowały i polepszały barwę traktowanego obiektu. Najczęściej do tego celu używa się olejów naturalnych, np. oleju kokosowego czy żywic naturalnych, np. balsamu kanadyjskiego, żywic syntetycznych, np. „Opticonu”, „Cjanolitu” i żeli syntetycznych, np. „Silikonu”. Pewną niedogodnością w stosowaniu tych substancji jest to, że niektóre z nich twardnieją na tyle szybko, iż niekiedy nie zdążą wypełnić w całości wszystkich wolnych przestrzeni w obiekcie; substancjami nadzwyczaj wolno twardniejącymi są żele. Niektóre oleje starzejąc się wysychają i stają się nieprzezroczyste; również ogrzanie lub naświetlenie (także światłem widzialnym) może pociągnąć za sobą zmianę barwy przestrzeni wypełnionych uprzednio cieczą lub żelem. Tego rodzaju substancje wypełniające z czasem mogą ulegać wypłukaniu wskutek działania różnych rozpuszczalników, np. wody mydlanej, wody gorącej, acetonu, słabych kwasów organicznych. Niektóre z substancji wypełniających źle znoszą podwyższone temperatury, np. „Opticon” — powyżej 110°C. Traktowanie przez wypełnienie wolnych przestrzeni cieczą lub żelem przeprowadza się często w warunkach działającego przemiennie podwyższonego ciśnienia i próżni. Ułatwia to wnikanie do wolnych przestrzeni traktowanego obiektu owych substancji. Jednocześnie zastosowanie tych substancji podnosi zwykle zwięzłość obiektu. Technikę tę stosuje się: c z ę s t o — w berylu (szmaragd), jadeicie i perłach; o k a z j o n a l n i e — w chryzoberylu (aleksandrycie), korundzie (rubin, szafir), topazie, turmalinie, granacie (andradycie-demantoidzie); s p o r a d y c z n i e — w spinelu, spodumencie i berylu (goszenicie, akwamarynie).

Rezultaty osiągnięte tą techniką są zwykle nieprzewidywalne do końca, niskiej jakości i dość małej trwałości.

● Plastik, które mogą być odpowiednio barwione. Stosuje się je dla maskowania niektórych pustek w obiektach gemmologicznych. Wypełnienia takie są mało odporne na działanie podwyższonej temperatury (już powyżej 80—150°C) i niektórych rozpuszczalników, np. acetonu, chloroformu. Twardość plastików też jest przeważnie dość niska (do 3,5 według skali Mohsa). Technika ta bywa stosowana: *okazjonalnie* — w bursztynie, jadeicie i opalu; *sporadycznie* — w korundzie (rubin, szafir), turmalinie, berylu (akwamaryn, szmaragd, goszenit), chryzoberylu (aleksandryt).

Rezultat zastosowania tej techniki bywa niepewny, przeważnie o niezadowalającej trwałości.

● Woski, których używa się dla nadania obiektowi gemmologicznemu wrażenia gładkości lub celem wzmocnienia intensywności barwy czy brylancji. Woski w obiektach traktowanych wypełniają wszelkie otwarte do powierzchni mikropory. Technikę tę stosuje się: *często* — w jadeicie i turkusie; *sporadycznie* — w turmalinie, korundzie (rubin, szafir), opalu, berylu (szmaragd), perłach naturalnych i hodowanych.

Rezultat stosowania tej techniki zazwyczaj jest niskiej trwałości.

B. Powleczenie obiektu gemmologicznego przez:

● Wytrącenie na jego powierzchni określonej substancji. Na przykład z roztworu zawierającego tytan w warunkach podwyższonej temperatury wytrąca się na powierzchni obiektu korundowego igielkowaty rutyl. Kierunkowe rozmieszczenie igielkowatego rutylu umożliwia wytworzenie się asteryzmu lub kociego oka. Efekt ten może być łatwo usunięty przez przeszlifowanie obiektu lub kwaśną kąpiel.

● Nałożenie na powierzchnię określonej substancji, np. warstewki plastiku. Substancja pokrywająca może być przezroczysta lub nieprzezroczysta, barwna lub bezbarwna. Trwałość tego rodzaju powłok jest zwykle nieduża. Technikę tę stosuje się: *często* — w jadeicie, diamencie; *okazjonalnie* — w korundzie, kwarcu (ametyście), berylu (szmaragd), perłach naturalnych i hodowanych, opalu; *sporadycznie* — w turmalinie, zoizycie (tanzanit), spinelu, granacie (grossular-tsaworyt), kordierycie, chryzoberylu, bursztynie, kwarcu (cytrynie) i berylu (goszenit, akwamaryn).

● Napylenie mikronowej warstewki par pierwiastka, np. złota, węgla lub związku chemicznego. Zasadniczym celem tej techniki jest wywołanie barwnego zjawiska optycznego (np. mikronowa warstewka złota napyłona na niebieski topaz wywołuje efekt iryzacji). Aby wywołać powierzchniowy efekt iryzacji dowolnego obiektu gemmologicznego, opracowano technikę polegającą na napyłaniu ich powierzchni mikronowej grubości warstewką węgla i umieszczeniu go pomiędzy dwiema elektrodami pod dużym napięciem (około 90 000 volt). Po splukaniu warstewki węgla alkoholem obiekt uzyskuje trwałą iryzację powierzchniową (z wyłączeniem opalu). Technikę napyłania mikronowej war-

— w topazie, diamencie, bursztynie; eksperymentalnie — w korundzie, opalu, berylu (szmaragd, goszenit, akwamaryn); trwałość powłok tego rodzaju jest niska, jedynie powłoki nakładane na diament wyróżniają się dużą trwałością.

● Pokrycie warstewką materiału syntetycznego. Procedura polega na wykorzystaniu obiektu wykonanego z materiału naturalnego w roli zarodka w procesie syntezy kryształu o tym samym składzie, np. metodą hydrotermalną. Technika ta może być stosowana do pokrywania warstewką materiału syntetycznego większości obiektów wykonanych z materiałów naturalnych. Dotychczas używano jej z interesującym rezultatem w stosunku do berylu (szmaragd) i kwarcu (ametyst, cytryn). Obiekt pokryty warstewką materiału syntetycznego wykazuje dwoistą naturę: materiału naturalnego w jego wnętrzu i materiału syntetycznego w pokrywającej go warstwie powierzchniowej. Granica materiału syntetycznego i naturalnego jest zwykle miejscem występowania drobnych spękań spowodowanych wewnętrznymi naprężeniami. Perły hodowane można uznać również za rezultat tej techniki, choć zarodek perły jest tworem sztucznym, a pokrywająca go warstewka jest tworem naturalnym. Technikę tę stosuje się w: berylu (szmaragd, goszenit, akwamaryn), korundzie (rubin, szafir) i kwarcu (ametyst, cytryn). Eksperymentalnie wykorzystywano ją również w opalu i chryzoberylu (aleksandrycie). Uzyskany rezultat wyróżnia się dobrą jakością i wysoką trwałością.

● Naklejanie, które polega na nałożeniu barwnej, niekiedy odblaskowej folii na tylną, często niedostępną dla obserwatora część obiektu gemmologicznego. Powoduje ono zwiększenie ilości odbitego światła, wytworzenie określonej barwy tego światła lub barwnego efektu optycznego, np. kociego oka w obiektach szlifowanych w formie kaboszonu, czy też gry barw (iryzacji). Współcześnie technika ta jest rzadko wykorzystywana, jednak w minionych wiekach stosowano ją częściej, zwłaszcza w obiektach wykonanych z bursztynu, opalu, korundu (szafir, rubin), cyrkonu, diamentu, turmalinu. Rezultaty tej techniki są niezbyt trwałe.

C. Modyfikacja warstwy przypowierzchniowej obiektu gemmologicznego, której celem jest polepszenie jego walorów estetycznych przez wzmocnienie intensywności barwy powierzchniowej warstewki. Technika modyfikacji barwy warstewki powierzchniowej obiektu polega na jej dyfuzyjnej penetracji przez atomy pierwiastków stymulujących barwę, czyli tzw. chromofory. Na przykład chrom dyfundujący w powierzchniową warstwę korundu intensyfikuje barwę czerwoną obiektu, żelazo i tytan dyfundując w powierzchniową warstewkę korundu intensyfikuje barwę niebieską obiektu, a żelazo i chrom dyfundując w korund, intensyfikuje barwę różowopomarańczową. Zazwyczaj trudno jest przewidzieć dokładnie zasięg warstewki o wzmocnionej, zintensyfikowanej barwie, mimo że proces dyfuzji atomów pierwiastka prowadzi się w warunkach podwyższonej temperatury. Na przykład korund poddaje się dyfuzji w temperaturze wyższej od 1700 °C i trwa niekiedy nawet wiele tygodni, ale warstewka

o zintensyfikowanej barwie nie przekracza zwykle miąższości 1 mm — atomy tytanu penetrują korund grubości 0,01—0,2 mm w temperaturze 1800°C podczas jednej doby. W celu uzyskania oczekiwanego rezultatu konieczne bywa stosowanie atmosfery ochronnej, np. redukcyjnej, obojętnej. Traktowanie dyfuzyjne jest używane do tuszowania zonalności materiałów syntetycznych, np. otrzymywanych metodą Verneuil. W wyniku prażenia w warunkach wysokotemperaturowych przez dostatecznie długi czas następuje dyfuzyjne przemieszczenie się atomów chromoforów i ich bardziej równomierne rozmieszczenie w materiale syntetycznym, a tym samym zatarcie jego zonalności. Warstewki dyfuzyjne z uwagi na ich nikłą grubość dają się łatwo usuwać przez szlifowanie, dlatego proces dyfuzyjny prowadzi się na obiektach z nałożonym szlifem.

7. Szlify

Nakładanie szlifi ma w zamierzeniu wyeksponowanie pewnych własności materiału gemmologicznego, takich jak brylancja, barwne efekty optyczne, oraz eliminację lub minimalizację innych właściwości materiału gemmologicznego, np. defektów, skaz, inkluzji. Sposób szlifowania dobiera się w zależności od własności fizycznych i optycznych materiału. Obecność szlifi może ułatwiać lub utrudniać identyfikację obiektu gemmologicznego. Na przykład polerowane fasetki ułatwiają wykonanie oznaczenia wartości współczynnika załamania światła, podczas gdy szlif kaboszonowy ogranicza możliwość jego precyzyjnego oznaczenia.

Szlify nakładane na materiały gemmologiczne przeważnie dzieli się na:

- historyczne, współcześnie rzadko używane, stosowane w początkowym okresie rozwoju różnych typów szlifi,
- standardowe, powielane w wielkiej liczbie egzemplarzy, których parametry ukształtowane zostały przez doświadczenie ugruntowane historycznie, mające oparcie w tradycji obróbki materiałów gemmologicznych,
- nowoczesne i fantazyjne, których parametry dobierane są indywidualnie na podstawie najnowszych osiągnięć optyki i metod szlifowania twardych materiałów, a które tworzy się przez zmianę proporcji szlifi tradycyjnych, ich mieszanie, łączenie lub wymyślanie całkiem nowych, nie używanych dotychczas kształtów i proporcji; wiele z nich ma charakter jednostkowy, unikatowy i opracowywane są z myślą o konkretnym znalezisku, np. wyjątkowego diamentu, korundu, berylu, czy topazu.

7.1. Szlify standardowe

Wśród szlifi standardowych wyróżnia się: szlify *k a b o s z o n o w e*, historycznie wcześniejsze, oraz szlify *f a s e t k o w e* (fasetowe), historycznie późniejsze.

7.1.1. Szlif kaboszonowy

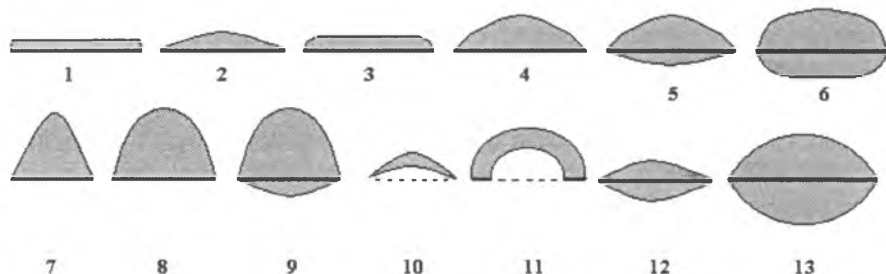
Najstarsze znaleziska z nałożonym szlifem kaboszonowym należą do zabytków sumeryjskich. Były to obiekty w różny sposób zaokrąglone, wygładzone i wypolerowane. Szlif kaboszonowy, czyli tzw. szlif gładki przetrwał do dnia dzisiejszego. Cechami wyróżniającymi szlif kaboszonowy są:

- wielość i obłość kształtów,
- zaokrąglenie krawędzi i naroży.

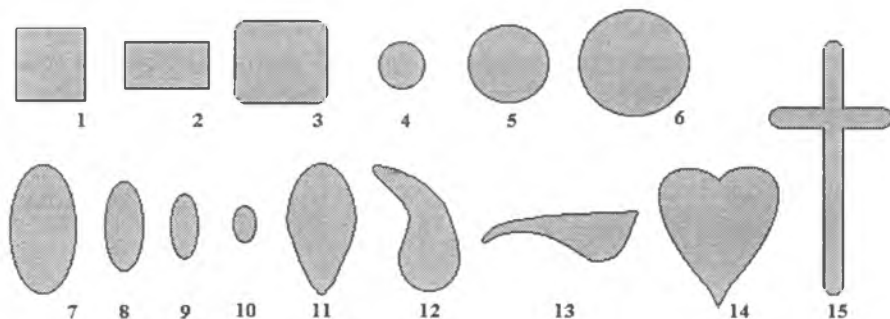
Jest wiele rodzajów szlifowania kaboszonowego (rys. 192), które można zgrupować w szlify:

- podwójne, w których obie części obiektu, czyli górna i dolna, są wypukłe, przy czym wypukłość części górnej jest zwykle większa; za szczególną formę kaboszonu podwójnego należy uznać obiekty szlifowane w formie kuli lub elipsoidy (tzw. jajka),
- pojedyncze, w których dolna powierzchnia obiektu jest płaska (tzw. spód obiektu), a górna wypukła,

A



B



Rys. 192. Formy kaboszonów

A. 1, 2, 3 — kaboszony niskie, 4, 5, 6 — kaboszony średnie, 7, 8, 9 — kaboszony wysokie, 10, 11 — kaboszony wypukło-wklęsłe, 12, 13 — kaboszony soczewkowe; B. 1, 2, 3 — kaboszony wielokątne, 4, 5, 6 — kaboszony okrągłe, 7, 8, 9, 10 — kaboszony owalne, 11, 12, 13 — kaboszony kroplowate, 14 — kaboszon „serce”, 15 — kaboszon „krzyżyk”

— wypukło-wklęsłe, w których dolna powierzchnia obiektu jest wklęsła lub wydrążona, a górna wypukła.

Głównymi elementami obiektów o szlifie kaboszonowym są:

- podstawa, czyli przeważnie płaska, rzadziej wklęsła lub wypukła, ścianka na spodzie obiektu,
- czasza, czyli górna, wypukłona część obiektu,
- faza, czyli przeważnie bardzo wąski pas biegnący wzdłuż granicy podstawy z czaszą po obwodzie obiektu.

Szlif kaboszonowy powstaje w kilku kolejnych etapach:

① ocena (badanie) surowca zmierzająca do wyznaczenia płaszczyzn odłupywania lub cięcia i szlifowania celem uwydatnienia najkorzystniejszych walorów estetycznych, np. specjalnych efektów optycznych na powierzchni;

② uzyskiwanie półproduktu przez piłowanie lub odłupywanie (otrzymuje się foremną bryłkę, płytkę lub kostkę o określonej wielkości lub grubości);

③ trasowanie obrysu przyszłego kaboszonu z wykorzystaniem szablonu i rysika z drutu aluminiowego, tak by podczas obróbki zarys konturu nie został zmyty przez płyn szlifierski, np. wodę, olej;

④ przytwierdzenie przyszłego kaboszonu do uchwytu za pomocą specjalnego lutu lub kitu;

⑤ szlifowanie zgrubne celem nadania ostatecznego kształtu kaboszonowi (z wykorzystaniem szlifierki wieloczynnościowej z pionowym układem tarcz ściernych, np. gruboziarnistych ściernic karborundowych);

⑥ szlifowanie wygładzające dla przygotowania powierzchni kaboszonu do nałożenia poleru (z wykorzystaniem drobnoziarnistych ściernic karborundowych lub drobnoziarnistego papieru ściernego);

⑦ przedpolerowanie i polerowanie dla nadania ostatecznego wyglądu powierzchni kaboszonu (z wykorzystaniem tarcz zaopatrzonych — zależnie od obrabianego materiału — w krążki filcowe, skórzane, drewniane, ołowiane z naniesionym odpowiednim środkiem polerskim, np. tlenkiem chromu, tlenkiem glinu, czerwienią polerską, diatomitem (trypoli), tlenkiem ceru);

⑧ oczyszczanie, np. w kąpeli o odpowiednio dobranym składzie lub w czyszczarkach ultradźwiękowych.

Szlify kaboszonowe przeważnie są nakładane na materiały nieprzezroczyste, przeświecające i półprzezroczyste lub na wykazujące barwne efekty optyczne — iryzację, asteryzm, kocie oko, opalizację, labradorescencję, mleczność, jedwabistość, czy też mające charakterystyczną teksturę (tzw. rysunek). Zastosowanie odpowiedniego szlif kaboszonowego uwydatnia i podkreśla niektóre własności optyczne materiału gemmologicznego. Na przykład dla ujawnienia i podkreślenia asteryzmu lub kociego oka szlifuje się obiekty wysoko, by zaostrić linię światła. Stwierdzono, że dobry efekt optyczny uzyskuje się, gdy kaboszon mający uwydatnić asteryzm lub kocie oko ma wysokość stanowiącą $\frac{1}{3}$ do $\frac{1}{2}$ szerokości obiektu, a opalizację, gdy grubość obiektu stanowi $\frac{1}{8}$ jego szerokości. Wzmocnienie efektu kociego oka uzyskuje się przez zwiększenie krzywizny wierzchołka kaboszonu nieznacznie wyciągniętego według smugi

światła efektu optycznego. Krzywizna ta zwęża smugę światła efektu optycznego do jasnej, wyraziście świecącej linii. Dla materiałów, których efekty optyczne ujawniają się w płaszczyźnie, np. w związku z rodzajem i sposobem rozmieszczenia inkluzji, stosowane są szlify kaboszonowe niskie. Materiałom o ciemnej barwie nadaje się często szlif wypukło-wklęsły zmniejszający wydatnie grubość obiektu i rozjaśniający tym samym jego barwę przez zwiększenie ilości przepuszczanego światła. Przy wyborze szlif kaboszonego przewidzianego do nałożenia na materiał bierze się pod uwagę także właściwości wytrzymałościowe surowca. Materiały o dużej wytrzymałości mogą być szlifowane cienko, podczas gdy materiały o małej wytrzymałości szlifuje się dość grubo. Obiekty takie mogą mieć bardzo różne kształty, np. wielokąta, owalu, kropki, serca, krzyża (rys. 192).

Innym typem szlifowania jest „hurtowe” szlifowanie materiałów gemologicznych o mniejszej wartości, czyli tzw. bębnowanie. Szlifowanie wykonuje się w obrotowych bębnach (beczkach), w których razem z nieforemnymi kawałkami surowca umieszcza się środki ściernie i płyny szlifierskie, a w końcowej fazie obróbki również środki polerujące. Wprawienie w ruch obrotowy z odpowiednio dobraną prędkością załadowanego pojemnika powoduje stopniowe wzajemne szlifowanie kawałków surowca przez ocieranie się. Końcowym produktem procesu bębnowania jest duża liczba umiarkowanie wypolerowanych obiektów o nieforemnych kształtach z zaokrąglonymi narożami i krawędziami, które obrobione w ten sposób uzyskują postać tzw. **baroków**. Wykorzystuje się je zwykle do masowej produkcji drobnej galanterii typu breloków, kolczyków, zapinek.

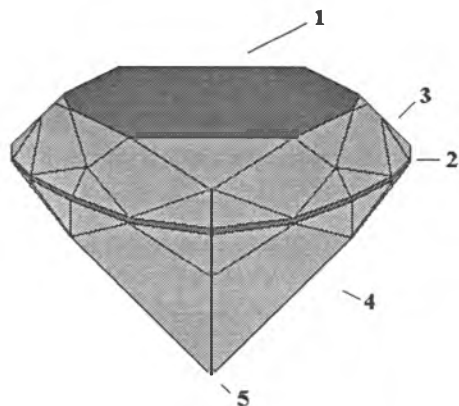
Do obiektów o szlifie podobnym do kaboszonów należy zaliczyć wyroby rzeźbiarskie, takie jak krzyżyki, kamee, intaglia, serca, figurki wyobrażające różne postacie.

Przy wyborze typu szlif kaboszonowego zaleca się dobór takich proporcji obiektu, aby nie odbiegały one znacząco od wymiarów standardowych, tj. żeby ich wysokość była w przybliżeniu połową średnicy małych obiektów okrągłych (do 0,5 cm średnicy) i stopniowo zmierzała do trzeciej części średnicy większych obiektów okrągłych (powyżej 2,5—3,0 cm średnicy). W przypadku obiektów owalnych zalecany jest taki dobór wysokości kaboszonu, by stanowiła ona w przybliżeniu połowę mniejszej jego średnicy.

7.1.2. Szlif fasetkowy (fasetowy)

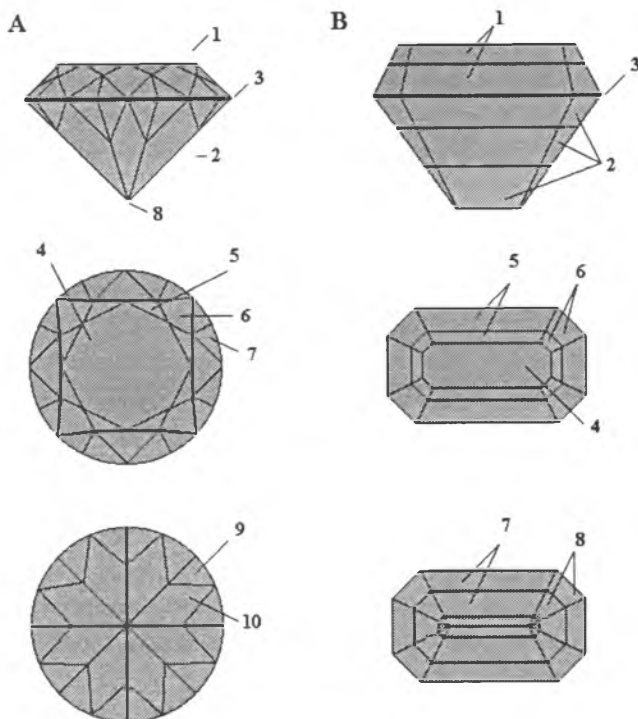
Rozpowszechnienie się w Europie sztuki szlif fasetkowego jest związane z działalnością szlifierzy weneckich i flandryjskich. Taki szlif prawdopodobnie pojawił się w Europie około XIV—XV wieku.

Obiekty z nałożonym szlifem fasetkowym mają sztucznie wytworzone płaskie ścianki nazywane fasetkami (fasetami). Są one ustawione względem



Rys. 193. Główne elementy szlifowania fasetkowego w rzucie przestrzennym

1 — tafla, 2 — rondysta, 3 — korona i fasetki korony, 4 — podstawa (pawilon) i fasetki podstawy, 5 — szpic (kolet)



Rys. 194. Typy szlifów fasetkowych (wg Maślankiewicza, 1982)

A. Szlif brylantowy: 1 — korona, 2 — podstawa, 3 — rondysta, 4 — tafla, 5 — fasetki tafla, 6 — fasetki główne korony, 7 — fasetki rondystowe korony, 8 — szpic, 9 — fasetki rondystowe podstawy, 10 — fasetki główne podstawy

B. Szlif schodkowy (szmaragdowy): 1 — korona, 2 — podstawa, 3 — rondysta, 4 — tafla, 5 — fasetki boczne korony, 6 — fasetki narożne korony, 7 — fasetki boczne podstawy, 8 — fasetki narożne podstawy

Uwaga! Szlif brylantowy oznacza formę okrągłą, która w górnej części ma przynajmniej 32 fasetki (bez tafla), a w dolnej — 24 fasetki (bez koletu)

Wyróżnia się dwa zasadnicze typy szlifowania fasetkowego (rys. 194):

- brylantowy,
- schodkowy (szmaragdowy).

Pod pojęciem szlifowania brylantowego rozumie się okrągłą formę, która w górnej części ma przynajmniej 32 fasetki (bez tafli), a w dolnej — 24 fasetki (bez koletu).

Na szlifowanie fasetkowe składają się następujące czynności:

① badanie (ocena) obiektu zmierzające do wyboru rodzaju szlifowania oraz ustalenia kierunków szlifowania i sposobu jego wykonania,

② odłupywanie lub piłowanie, którego celem jest oddzielenie niepotrzebnych fragmentów,

③ osadzenie obiektu w specjalnym uchwycie za pomocą odpowiedniego lutu lub kitu,

④ zaowalanie zmierzające do usunięcia naroży i przygotowania powierzchni do wykonania ścianek (fasetek),

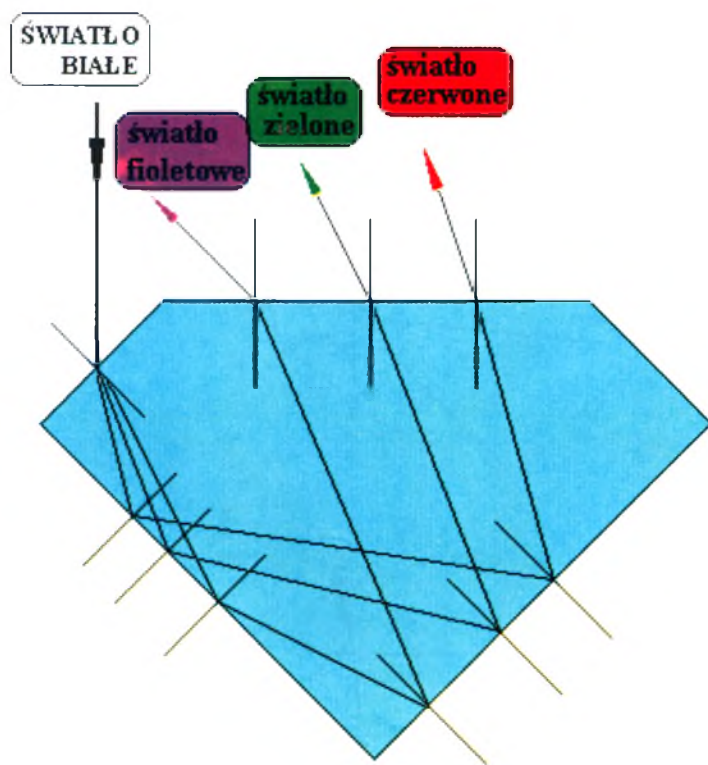
⑤ szlifowanie tafli i fasetek, które wykonywane są z wykorzystaniem szybkoobrotowych szlifierek o przeważnie poziomym układzie tarczy szlifierskiej; uchwyt obiektu podczas szlifowania jest mocowany w specjalnym ramieniu, którego konstrukcja umożliwia wielokrotną zmianę kąta jego nachylenia adekwatnie do aktualnie wykonywanej fasetki,

⑥ polerowanie zmierzające do nadania ostatecznego wyglądu fasetkom; wykonywane jest zależnie od rodzaju obrabianego materiału na odpowiednio dobieranych tarczach polerskich, np. miedzianych, ołowianych, cynowych z wprasowanym bardzo drobnoziarnistym ścierniwem ($\sim 5 \mu$) lub nakładaną pastą polerską,

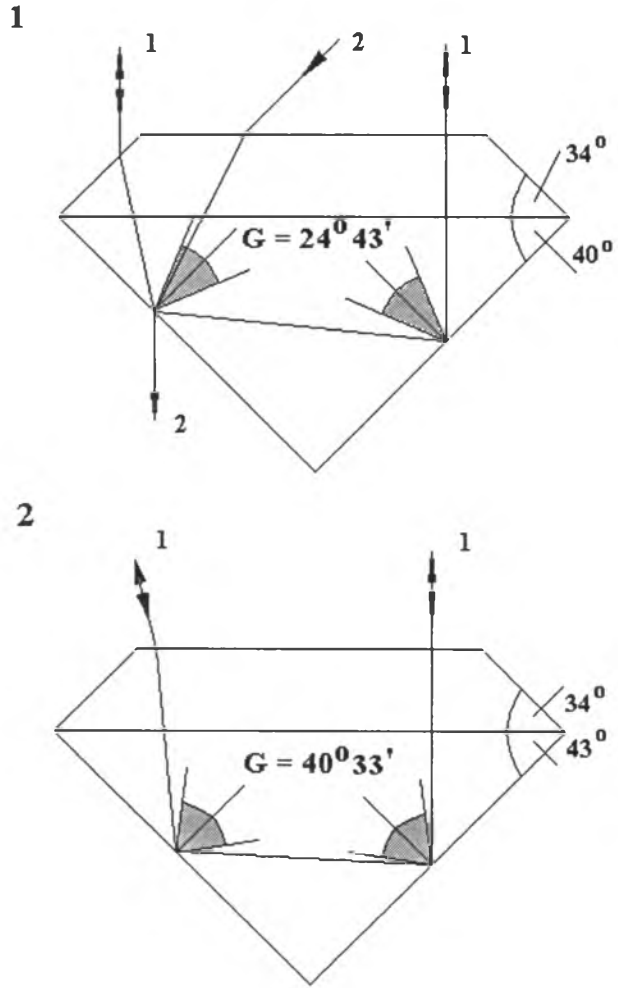
⑦ oczyszczanie, np. w czyszczarkach ultradźwiękowych.

Szlif brylantowy nakłada się głównie na materiały przezroczyste, a szczególnie chętnie na diament, z zamiarem uzyskania najkorzystniejszych efektów optycznych, które obejmowane są ogólnym mianem brylancji. Na brylancję składają się:

- brylancja zewnętrzna, czyli tzw. blask lub połysk; jest ona rezultatem współdziałania współczynnika załamania światła materiału i jakości uzyskanego poleru tafli obiektu; powstaje w związku z odbiciem światła od powierzchni korony,
- brylancja wewnętrzna, czyli tzw. życie lub jasność; jest ona spowodowana całkowitym wewnętrznym odbiciem światła od fasetek podstawy obiektu; im więcej światła odbije się w podstawie obiektu z nałożonym szlifem fasetkowym, tym jest on żywszy lub jaśniejszy (rys. 195) i zależy od wielkości tafli, proporcji podstawy oraz symetrii, wielkości obiektu i zależności kątowych pomiędzy fasetkami korony,
- brylancja rozproszona, czyli tzw. ogień lub gra barw; jest wynikiem dyspersji współczynnika załamania światła; zależy od wielkości powierzchni fasetek oraz od kąta rozwarcia korony (rys. 196).



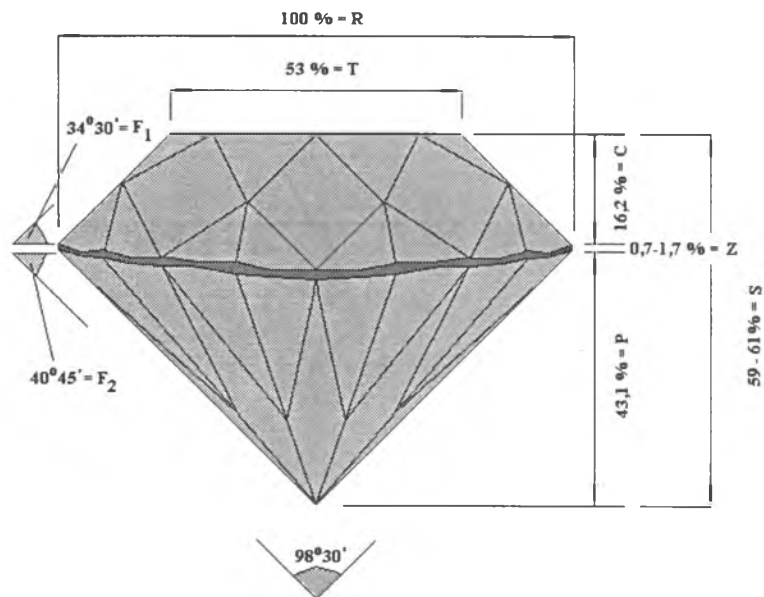
Rys. 196. Dyspersja światła białego (**B**) w silnie dyspersyjnym obiekcie gemmologicznym z nałożonym szlifem fasetkowym



Rys. 195. Zależność zjawiska całkowitego wewnętrznego odbicia światła od kąta granicznego (G) w obiekcie z nałożonym szlifem fasetkowym; na przykładzie diamentu (1) i kwarcu (2) (wg Reada, 1991)

Wpływ szlifu brylantowego na brylancję obiektu wynika z jego parametrów (rys. 197), czyli:

- ze średnicy rondysty (R),
- ze średnicy tafli (T),
- z wysokości korony (C),
- z głębokości podstawy (P),
- z całkowitej wysokości szlifu (S),
- z kąta nachylenia głównych fasetek korony względem płaszczyzny rondysty ($F1$),
- z kąta nachylenia głównych fasetek podstawy względem płaszczyzny rondysty ($F2$),
- z wysokości rondysty (Z).



Rys. 197. Parametry szlif brylantowego wg standardu amerykańskiego (Tolkowsky). Objasnienia w tab. 26 i w tekście

Błędy brylancji wynikają głównie z nieprawidłowej obróbki lub doboru niewłaściwego szlif, gdy dla zachowania jak największej masy obiektu dobiera się szlif pozbawiający go części efektywnych zjawisk optycznych. Do pospolitych błędów brylancji należą:

- efekt „okna”, gdy światło przenika przez obiekt bez odbicia się od fasetek podstawy; w badaniu lupowym widoczny jest wyraźnie krąg ciemnych plam w brzeżnej części tafli oglądanej prostopadle od góry z odległości około 25—30 cm,
- „wyciek światła”, gdy światło odbite pierwszy raz od fasetek podstawy nie ulega ponownie odbiciu od fasetek podstawy, lecz wychodzi przez nie na zewnątrz; podczas obserwacji lupowej widać ciemne plamy w centralnej części tafli oglądanej prostopadle od góry z odległości 25—30 cm, a obiekt sprawia wrażenie pochłaniającego światło.

Aby z materiału można było wydobyć najkorzystniejsze efekty optyczne, szlif brylantowy musi spełnić określone proporcje. Do tego celu używa się tzw. standardów, czyli praktycznie sprawdzonych wzorców szlif brylantowego uwzględniających przewidywania i założenia teoretyczne. Na diament nakłada się często szlify według standardu:

- skandynawskiego, zwanego także standardem europejskim lub szlifem Tillandera (1969),
- amerykańskiego, zwanego także szlifem Tolkowsky’ego (1919),
- niemieckiego, zwanego także szlifem Epplera (1949),

- szlifu Parkera (1951, USA),
- szlifu Kaplana (?, USA),
- szlifu Wade'a (1896, USA),
- szlifu „idealnego” (1926, USA).

Proporcje poszczególnych elementów szlifu brylantowego wyraża się w procentach średnicy rondysty oraz w wartościach kątowych określających nachylenie fasetek korony i podstawy obiektu względem płaszczyzny rondysty (tab. 26). Proporcje obiektów z nałożonym szlifem brylantowym mogą być oceniane jakościowo w kilkupunktowej skali (bdb. — proporcje bardzo dobre, db. — proporcje dobre, śr. — proporcje średnie, sł. — proporcje słabe).

Tabela 26

Proporcje szlifu brylantowego według różnych standardów

Parametr		Standard		
		Tillandera (skandynawski, europejski)	Tolkowsky'ego (amerykański)	Epplera (niemiecki)
Średnica rondysty	(R)	100%	100%	100%
Średnica taflí	(T)	57,5%	53,0%	56,0%
Wysokość korony	(C)	14,6%	16,2%	14,4%
Głębokość podstawy	(P)	43,1%	43,1%	43,2%
Całkowita wysokość szlifu	(S)	57,7%	59,3%	57,6%
Kąt nachylenia fasetek korony względem płaszczyzny rondysty	(F ₁)	34°50'	34°50'	33°20'
Kąt nachylenia fasetek podstawy względem płaszczyzny rondysty	(F ₂)	40°75'	40°80'	40°75'
Wysokość rondysty	(Z)	0,5—2%	0,7—7%	0,6—1,5%

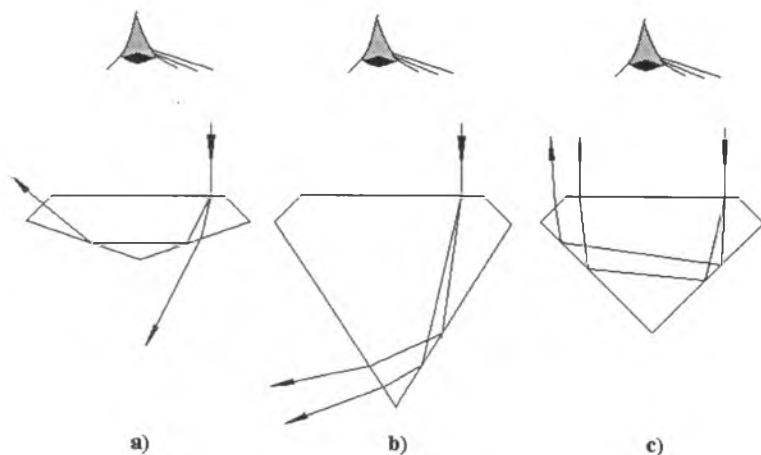
Pozostałe materiały gemmologiczne nie doczekały się jeszcze swoich standardów nakładanego na nie szlifu fasetkowego. Niemniej dla wydobycia z nich jak najkorzystniejszych estetycznych efektów optycznych muszą być spełnione pewne warunki brzegowe proporcji nakładanego na nie szlifu fasetkowego (tab. 27). Racjonalne proporcje nakładanych szlifów nie zawsze są przestrzegane, gdyż przy wyborze szlifu stale szuka się kompromisu między potrzebą zapewnienia jak najkorzystniejszych efektów optycznych a potrzebą zachowania możliwie największej masy kryształu poddawanego szlifowaniu. Zadanie to nie jest łatwe, gdyż komplikuje je często niezbyt foremna i jednolita postać naturalnych monokryształów. Również natężenie i rozkład barwy w surowcu może mieć wpływ na wybór proporcji zastosowanego szlifu. Materiały intensywnie wybarwione, z zastosowaniem zbyt głębokiego szlifu, tzn. gdy głębokość podstawy obiektu jest za duża, stają się zbyt ciemne lub nawet nieprzezroczyste, 247

Niezbędne proporcje szlifu fasetkowego dla wydobycia korzystnych efektów optycznych z różnych materiałów gemmologicznych*

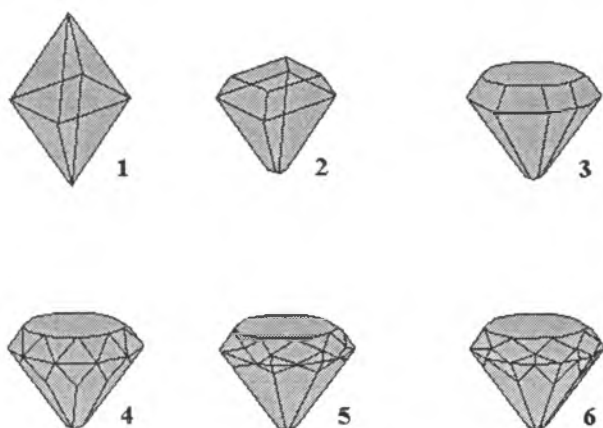
Parametr	Diamant	Cyrkon	Korund	Spinel	Topaz	Turmalin	Beryl (szmaragd)	Kwarc (kryształ górski)
Współczyn- nik zała- mania światła [n]	2,42	1,95	1,77	1,73	1,63	1,62	1,58	1,54
Kąt gra- niczny (G) [°]	24,5	30,9	34,5	35,5	37,8	38,1	39,3	40,5
Średnica tafli (T) [%]	50,0	59,0	60,0	60,5	61,0	59,0	56,6	44,2
Wysokość korony (C) [%]	19,0	22,0	24,0	24,6	26,0	27,3	28,1	27,5
Głębokość podstawy (P) [%]	40,0	40,7	40,9	41,0	41,1	40,7	41,1	42,9
Całkowita wysokość szlifu (S) [%]	59,0	63,0	64,9	65,6	67,0	68,0	69,2	70,4
Nachylenie fasetek korony względem płaszczyz- ny ron- dysty (F ₁) [°]	41,1	47,0	50,2	51,1	53,0	53,1	52,3	44,5
Nachylenie fasetek podstawy względem płaszczyz- ny ron- dysty (F ₂) [°]	38,5	38,8	38,9	39,0	39,1	39,1	39,4	40,6

podczas gdy zbyt płytki szlif powoduje nadmierne ograniczenie brylancji wewnętrznej obiektu wskutek silnej redukcji ilości światła podlegającego całkowitemu wewnętrznemu odbiciu od fasetek podstawy (rys. 198). Warto zaznaczyć, że przy wyborze rodzaju nakładanego szlif dość często świadomie rezygnuje się z wydobycia jak najkorzystniejszych efektów optycznych na rzecz zapewnienia możliwie największego ograniczenia straty masy obiektu.

Szlif brylantowy rozwijał się stopniowo, poczynając od naturalnej, ośmiościennnej postaci diamentu, czyli tzw. szpiczastego kamienia, poprzez formy coraz



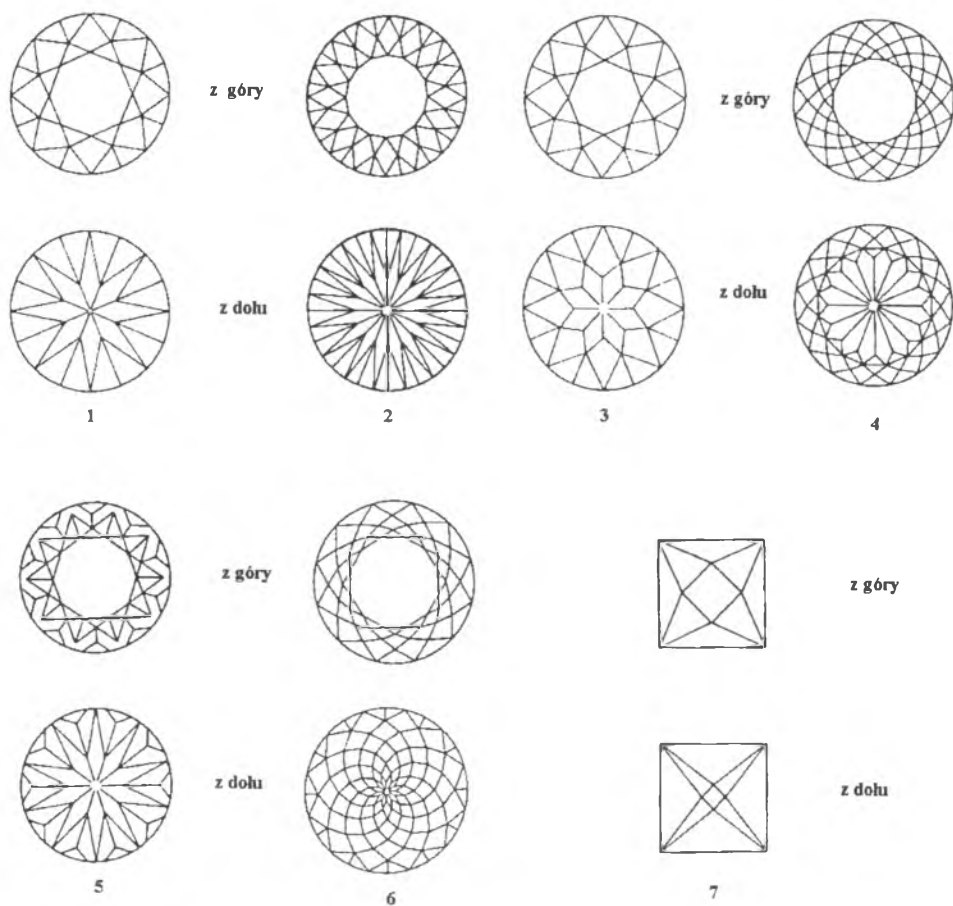
Rys. 198. Bieg skrajnych promieni wiązki światła białego w brylancie
a) o zbyt płaskim szlifie, b) o zbyt głębokim szlifie, c) o szlifie racjonalnym



Rys. 199. Ewolucja szlif brylantowego
1 — szpiczasty kamień, 2 — płaski kamień, 3 — pojedyncze dobro,
4 — podwójne dobro (szlif Mazariniego), 5 — potrójne dobro (szlif Peruzziego), 6 — szlif brylantowy standardowy (tzw. starszy)

to bardziej odbiegające od naturalnej postaci diamentu, o coraz to bardziej zwiększającej się ilości nakładanych fasetek (rys. 199). Stały postęp wiedzy optycznej i nawarstwianie się różnych doświadczeń szlifierzy pozwoliły na opracowanie wielu nowszych rodzajów szlifów brylantowych (rys. 200). Obiekty o szlifie fasetkowym są zróżnicowane ze względu na kształt. Na tej podstawie wyodrębnia się formy: owalne, prostokątne, kwadratowe, rombówce, wielokątne, beczułkowate, kuliste, łezkowe, gruszkowate, kropłowe itp. Obiekty niewielkie przeważnie są opatrywane tzw. uproszczonym (prostim) szlifem brylantowym (rys. 201).

Pod pojęciem szlifów schodkowych (szmaragdowy) rozumie się formę wielokątną w płaszczyźnie rondysty mającą fasetki o dolnych i górnych krawędziach równoległych do płaszczyzny rondysty (por. rys. 194). W wersji standardowej



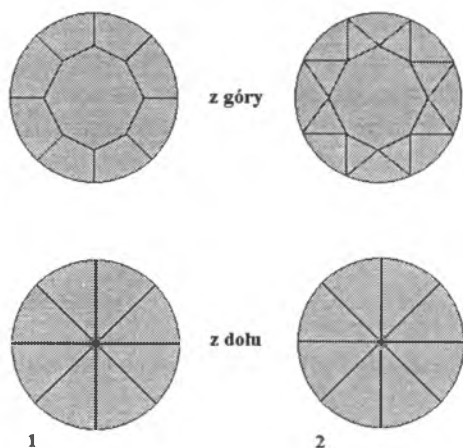
Rys. 200. Nowsze rodzaje szlifów brylantowych (wg Maślankiewicza, 1982)

1 — standardowy nowszy, 2 — podwójny, 3 — cyrkonowy, 4 — portugalski, 5 — „Magna”,

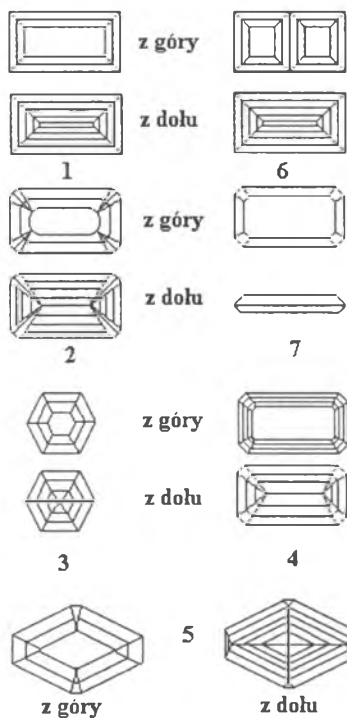
250 6 — spiralny, 7 — francuski

Rys. 201. Uprozczone szlify brylantowe (wg Płaszyńskiej, 1988)

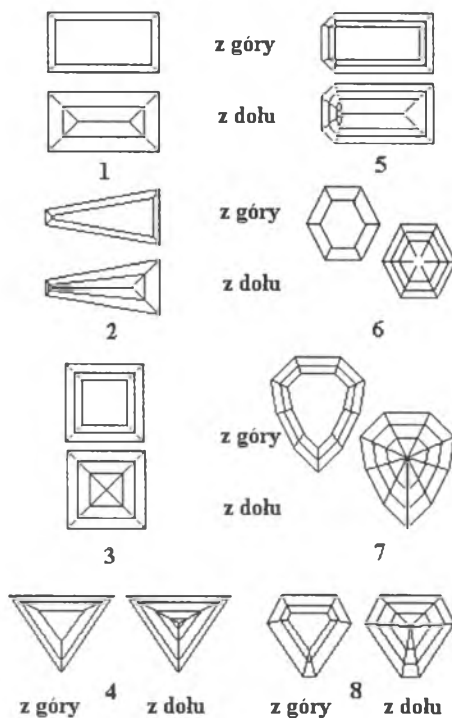
1 — ośmiokant, 2 — szesnastokant



A



B



Rys. 202. Wybrane szlify fasetkowe schodkowe (wg Maślankiewicza, 1982)

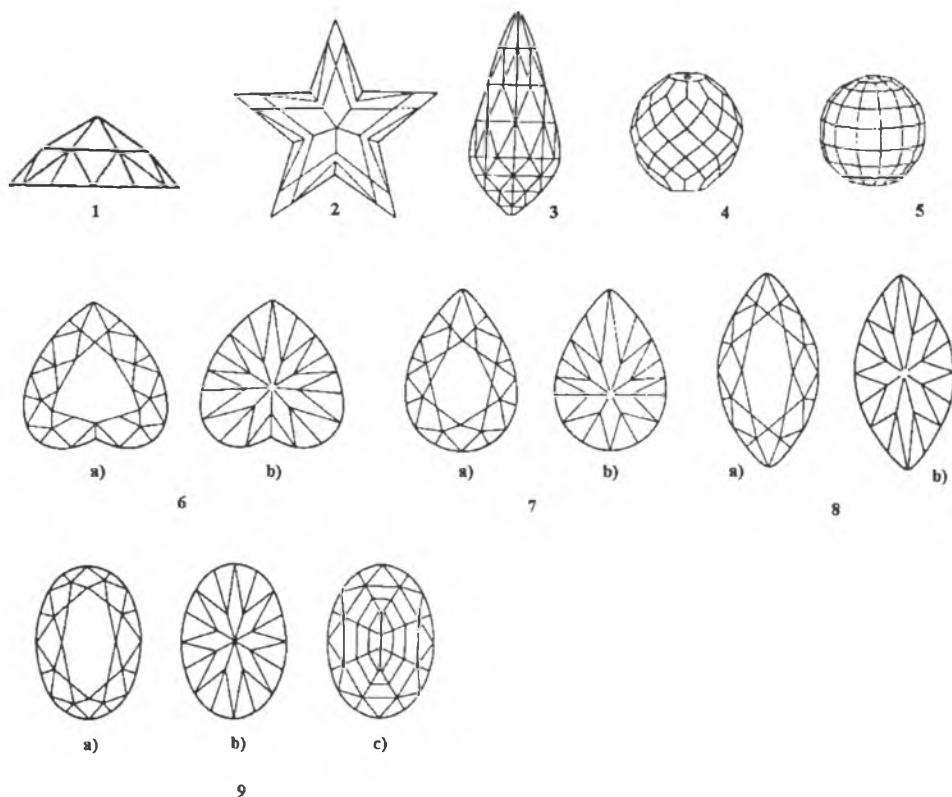
A — nakładane na obiekty duże i średnie: 1 — poduszkowy, 2 — antyczny, 3 — sześciokątny, 4 — szmaragdowy, 5 — rombowy, 6 — o podwójnej koronie, 7 — sygnetowy

B — nakładane na obiekty małe: 1 — bagiet, 2 — trapez-bagiet, 3 — kwadrat, 4 — trójkąt, 5 — okno, 6 — sześciokąt, 7 — tarcza, 8 — cielec

szlif schodkowego wysokość korony wynosi $\frac{1}{3}$ całkowitej wysokości obiektu, a szerokość taflí — połowę szerokości rondysty. Szlif schodkowy nakłada się zwykle na przezroczyste materiały barwne, rzadziej na przeświecające lub nieprzezroczyste. Na przestrzeni dziejów ukształtowały się liczne odmiany szlif schodkowego. Niektóre z nich częściej są nakładane na obiekty duże i średnie, inne częściej spotyka się na obiektach małych i bardzo małych (rys. 202).

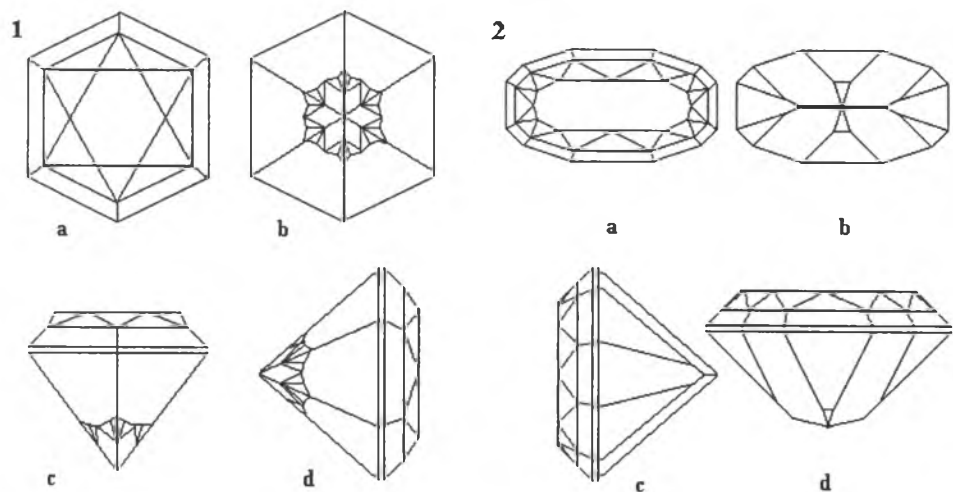
7.2. Szlify fantazyjne

Szlify fantazyjne różnią się od szlifów tradycyjnych (klasycznych) wykorzystaniem kombinacji różnych form geometrycznych: trapezu, rombu, elipsy, koła, sześciokąta, prostokąta, kwadratu, trójkąta. Szlify tego rodzaju tworzy się także przez:



Rys. 203. Różne nowsze szlify fasetkowe (wg Maślankiewicza, 1982)

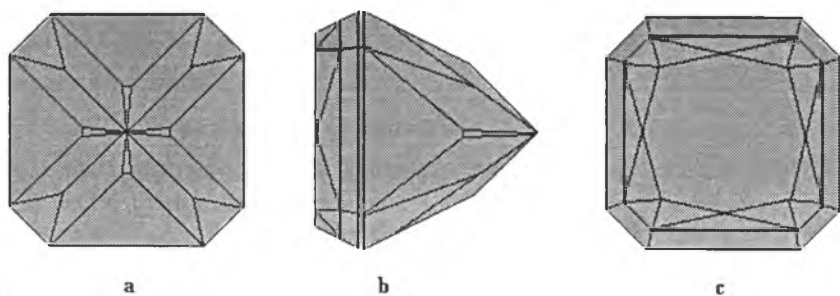
1 — rozeta, 2 — gwiazda, 3 — briolet, 4 — baryłka, 5 — oliwka, 6 — serce (a) widok z góry, b) widok z dołu), 7 — gruszka (a) widok z góry, b) widok z dołu), 8 — markiza (a) widok z góry, b) widok z dołu), 9 — owal (a) widok z góry, b) wariant z podstawą w postaci szpica, c) wariant z podstawą w postaci schodkowej)



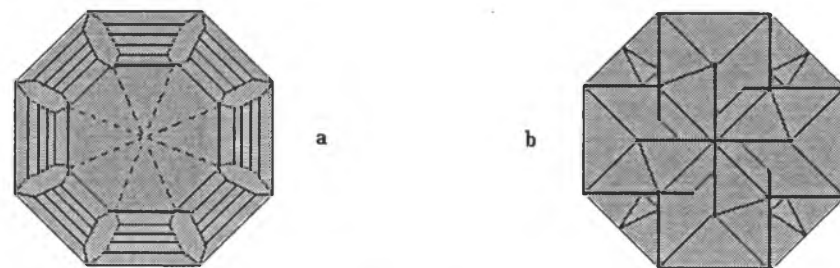
Rys. 204. Nowocześniejsze szlify fasetkowe

1 — róża (a — widok z góry, b — widok z dołu, c — widok z boku, d — widok z boku), 2 — „dalia” (a — widok z góry, b — widok z dołu, c — widok z boku, d — widok z boku)

1



2

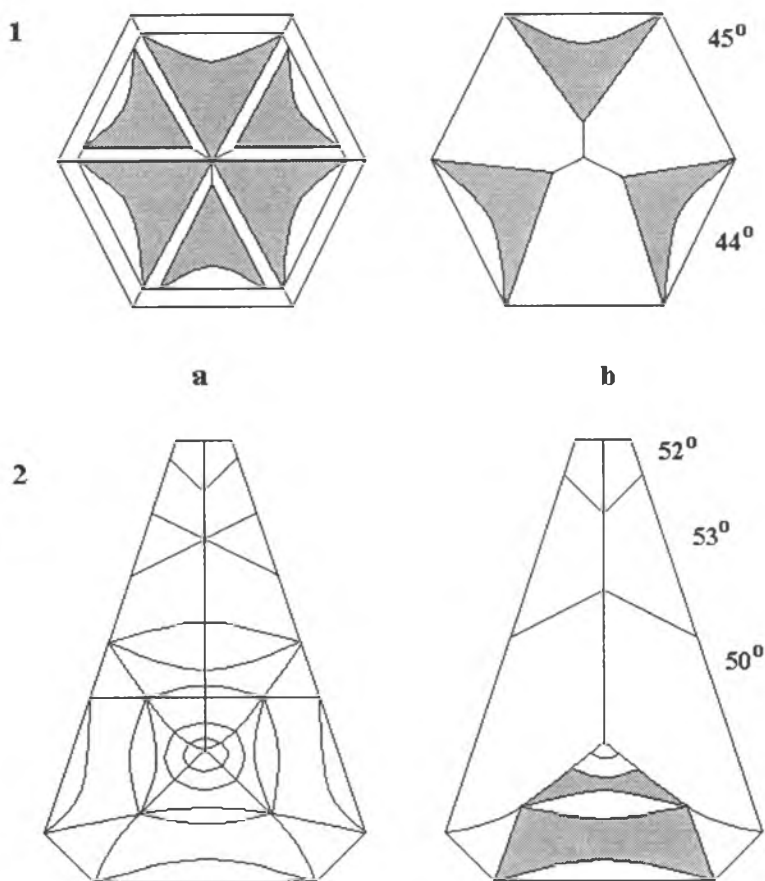


Rys. 205. Nowocześniejsze szlify fasetkowe

1 — „słonecznik” (a — widok z dołu, b — widok z boku, c — widok z góry), 2 — „sexy-brill” (a — widok z góry, b — widok z dołu)

- zmianę proporcji szlifów tradycyjnych,
- łączenie lub mieszanie szlifów klasycznych: np. szlif kaboszonowy ze szlifem brylantowym, szlif kaboszonowy ze szlifem szmaragdowym, szlif brylantowy ze szlifem szmaragdowym,
- likwidację jednego z zasadniczych elementów szlifowania klasycznego, np. korony lub podstawy,
- zmianę tradycyjnego wyglądu szlifowania np. z wypukłego na wklęsło-wypukły.

Niektóre z tych szlifów bywają wykonywane w jednostkowych egzemplarzach, niekiedy na indywidualne, specjalne zamówienie. W zasadzie istnieje nieograniczony zbiór szlifów fantazyjnych. Przykłady takich szlifów przedstawiono na rys. 203—206. Ich wykonawstwo wymaga dużych umiejętności, sporego doświadczenia i jest pracochłonne. Jednak szlif tego rodzaju może stanowić dodatkowy, samoistny walor obdarzonego nim obiektu gemmologicznego.



Rys. 206. Najnowocześniejsze szlify nakładane na materiały gemmologiczne
1 — „irys”, 2 — „halo” (a — widok z góry, b — widok z dołu)

7.3. Ocena szlifu

Oceny poprawności i jakości szlifu obiektu jubilerskiego dokonuje się zwykle za pomocą binokularu gemmologicznego (GemoLitu, GemSkopu) lub nawet zwykłej lupy gemmologicznej. Ocenę rozpoczyna się od szacowania tafli, której błędy mogą polegać na:

- nierównoległości płaszczyzny tafli względem płaszczyzny rondysty,
- nieforemności konturu tafli (zwykle jest to umiarowy wielobok),
- asymetrycznym przesunięciu tafli względem osi obiektu,
- niskiej jakości nałożonego poleru (widoczne zarysowania).

W następnej kolejności oceniane są fasetki rondystowe, korony i podstawy, które powinny sobie odpowiadać, być płaskie i dobrze wypolerowane, co jest gwarancją możliwości uzyskania najlepszej możliwej do osiągnięcia brylancji. Poler najwyższej jakości i doskonałą płaskość fasetek można otrzymać jedynie w obiektach dostatecznie twardych. Uzyskanie wysokiej jakości poleru i doskonałej płaskości fasetek rondystowych w materiałach miękkich wymaga od szlifiera dużego doświadczenia.

W dalszej kolejności sprawdza się pozostałe rzędy fasetek korony, które mogą mieć błędy polegające na:

- niejednakowym kształcie i wielkości w pasach,
- braku kontaktów wzdłuż linii prostych i punktów,
- zachodzeniu na siebie niektórych fasetek,
- występowaniu fasetek dodatkowych,
- niskiej jakości poleru.

Błędy szlifu rondysty mogą polegać na:

- zbyt dużej grubości, która powinna być odwrotnie proporcjonalna do wielkości obiektu,
- zbyt małej grubości (rondysta nożowa), gdy na pewnym odcinku krawędzie rondysty zbiegają się, dając cienkie ostrze, które łatwo może ulec uszkodzeniu podczas oprawiania obiektu,
- nierównoległości krawędzi (rondysta klinowa), które tworzą klin zakłócający przebieg światła w obiekcie,
- falistości krawędzi, co zmienia proporcje fasetek rondystowych i zmniejsza przepływ światła, obniżając tym samym brylancję i utrudniając oprawę obiektu,
- nieforemności rondysty (owal, owal o postrzępionych krawędziach).

Z kolei fasetki podstawy mogą mieć błędy polegające na:

- niejednakowym kształcie i wielkości w pasach,
- braku kontaktu wzdłuż linii prostych lub punktów,
- niedopolerowaniach,
- występowaniu fasetek dodatkowych,
- zachodzeniu na siebie niektórych fasetek.

Podstawa może wykazywać wady polegające na:

- skróceniu względem korony,
- niesymetryczności (asymetryczności),
- zbytnim spłaszczeniu (płytką podstawą),
- zbytnim wydłużeniu (podstawa głęboka).

Ocenia się także poprawność koletu, który przy powiększeniu do $10\times$ nie powinien być widoczny. Oglądany przy większych powiększeniach powinien być umiarem wielobokiem. Jego regularność świadczy o dużej staranności i dokładności w wykonaniu fasetek głównych podstawy.

Jakość szlifu jest ustalana według czteropunktowej skali (tab. 28), przyjmując, że błąd jest mały, gdy nie powoduje wyraźniejszego zakłócenia biegu światła w obiekcie lub gdy jest on łatwy do ukrycia w oprawie.

Tabela 28

Uproszczona ocena jakości obróbki obiektu gemmologicznego

Jakość obróbki		Liczba błędów	Proporcje szlifu
Bardzo dobra	95—100%	—	bardzo dobre
Dobra	90—95%	jeden błąd duży lub do czterech błędów małych	dobrze i bardzo dobre
Średnia	85—90%	do dwóch błędów dużych lub do ośmiu błędów małych	dobrze
Słaba	80—85%	powyżej dwóch błędów dużych lub do ośmiu błędów małych	

Obiekty z nałożonym szlifem mogą wykazywać również ubytki: pierwotne, np. po inkluzjach, łupliwości, spękaniach, nie przeszlifowanych ścianach naturalnych i wtórne (powstałe w rezultacie użytkowania).

Ubytki obiektu oceniane są w podobny sposób jak jakość szlifu (tab. 29). Uważa się je za małe, gdy nie powodują wyraźniejszego zakłócenia biegu światła w obiekcie lub też są łatwe do ukrycia w jego oprawie.

Tabela 29

Uproszczona ocena ubytków obiektu gemmologicznego

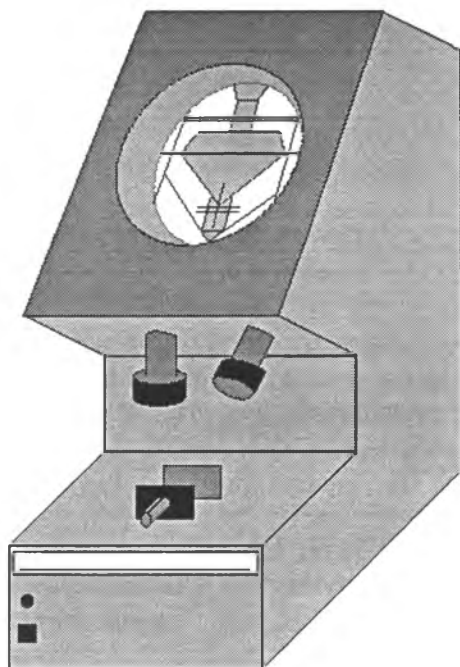
Stan obiektu	Liczba i znaczenie ubytków
Bardzo dobry	—
Zadowolający	jeden duży ubytek lub cztery małe ubytki
Umiarkowany	dwa duże ubytki lub do ośmiu małych ubytków
Słaby	ponad dwa duże ubytki lub ponad osiem małych ubytków

7.3.1. Proporcjoskop

Uzyskanie najkorzystniejszych efektów optycznych w obiekcie gemmologicznym zapewnia tylko obiekt o właściwie dobranych proporcjach nałożonego szlif fasetkowego. Ocena proporcji szlif fasetkowego sprowadza się zwykle do porównania go z uznanym i stosowanym powszechnie standardem. Dotychczas standardy takie opracowano i wdrożono dla diamentu. Nakładany szlif musi uwzględniać zwłaszcza wpływ współczynnika załamania światła materiału i wynikający z tego pośrednio kąt graniczny (por. rozdz. 7.1.2).

Podstawowym przyrządem pomocnym dla oceny proporcji obiektów szlifowanych jest proporcjoskop. Pozwala on uzyskać powiększony obraz obiektu na ekranie zaopatrzonym w podziałkę, na którym zaznaczona jest sylwetka obiektu z nałożonym szlifem fasetkowym o proporcjach zgodnych z wybranym standardem, np. skandynawskim, amerykańskim, przy czym istnieje możliwość takiej zmiany powiększenia, by obraz średnicy rondysty badanego obiektu był równy średnicy rondysty standardu. Możliwe jest wtedy bezpośrednie określenie odchyłek poszczególnych wymiarów obiektu względem standardu, wyrażonych w procentach. Przyrząd ten umożliwia badanie obiektów o wielkości od 0,18 karata do 8,0 karatów (rys. 207). Proporcjoscopsy mają zwykle dołączone tablice ułatwiające dokonywanie potrzebnych przeliczeń.

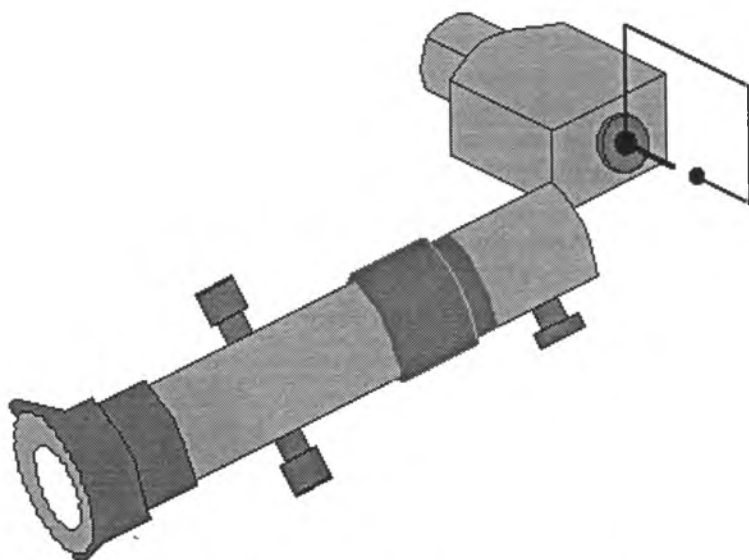
Ten sam rezultat, lecz z większym nakładem pracy, można osiągnąć za pomocą zestawu do oceny obiektów z nałożonym szlifem fasetkowym. Stanowi



Rys. 207. Proporcjoskop (sylwetka obiektów gemmologicznych wg standardu skandynawskiego, amerykańskiego i niemieckiego)

on wyposażenie dodatkowe binokularu gemmologicznego. Zestaw pozwala analizować obiekty o wielkości od 0,02 karata do 5,75 karatów. Zasada oceny proporcji obiektu sprowadza się do porównania realnych proporcji obiektu, mierzonych skalibrowanym okularzem mikrometrycznym, z wartościami jednego z wybranych standardów, np. skandynawskiego, amerykańskiego o takiej samej średnicy rondysty obiektu.

Podobną rolę odgrywa również proporcjoskop kieszonkowy (tzw. handskop), który w swej istocie jest ręcznym mikroskopem zaopatrzonym w okular mikrometryczny z wytrawionym standardem skandynawskim. Stabilizację obiektu podczas dokonywania odczytu proporcji zapewnia uchwyt przytwierdzony do proporcjoskopu (rys. 208). Umożliwia on dokonywanie pomiarów z wyko-



Rys. 208. Proporcjoskop kieszonkowy (tzw. handskop) (wg Reada, 1991)

rzystaniem 10—20-krotnych powiększeń. Przyrządem tym mogą być oceniane obiekty o wielkości od 0,25 karata do 2,0 karatów. Pomiar jest wykonywany z dokładnością około 1%. W pracy z tym przyrządem konieczne jest stosowanie oświetlenia zewnętrznego.

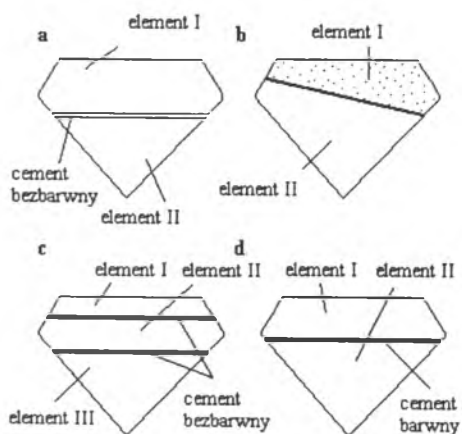
Do badania proporcji (wymiarów) obiektów gemmologicznych można wykorzystać też prostsze przyrządy pomiarowe, jak suwmiarki szczękowe z zegarowym lub cyfrowym polem odczytu czy też przyrząd Leveridge'a. Wyniki uzyskiwane podczas badania wymiarów podaje się zwykle z dokładnością do 0,01 mm. Istnieją również mierniki elektroniczne (np. Presidium

8. Obiekty składane (duplety, tryplety, kwadruple, multipty)

Obiekty gemmologiczne złożone z dwu lub większej liczby elementów, połączone ze sobą z inicjatywy człowieka, zależnie od liczby elementów uczestniczących w połączeniu nazywa się odpowiednio:

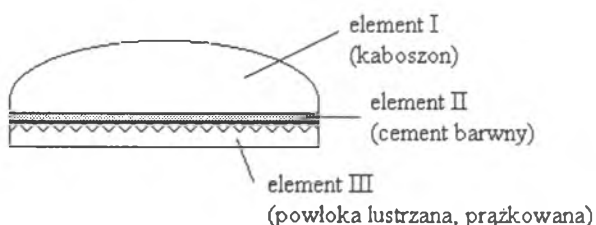
- dubletem, gdy chodzi o połączenie dwu elementów (rys. 209 a, b),
- trypletem, gdy chodzi o połączenie trzech elementów (rys. 209 c, d),
- kwadruplem, gdy chodzi o połączenie czterech elementów,
- multipletem, gdy chodzi o połączenie jeszcze większej liczby elementów.

Składnikami dubletów, trypletów i multiptów mogą być elementy wykonane z materiałów naturalnych i syntetycznych, zarówno krystalicznych (monokrystalicznych lub polikrystalicznych), jak i amorficznych (np. szkło, plastik, żywica, emalia). Ważnym składnikiem takich zespołów są cementy, czyli różnorakie spoiwa, które mogą być barwne lub bezbarwne. Spośród nich tylko cementy różniące się od otoczenia barwą traktowane są jak odrębny element



Rys. 209. Duplety (a, b) i tryplety (c, d)
(wg Reada, 1991)

zespołu. Głównym zadaniem cementów barwnych oprócz możliwie trwałego połączenia jest nadanie lub wzmocnienie barwy dubletu, trypletu lub multipletu, a niekiedy wytworzenie lub wzmocnienie określonych barwnych efektów optycznych (rys. 210), podczas gdy jedynym zadaniem cementów bezbarwnych jest możliwie trwałe i niezauważalne dla oka połączenie ich elementów.



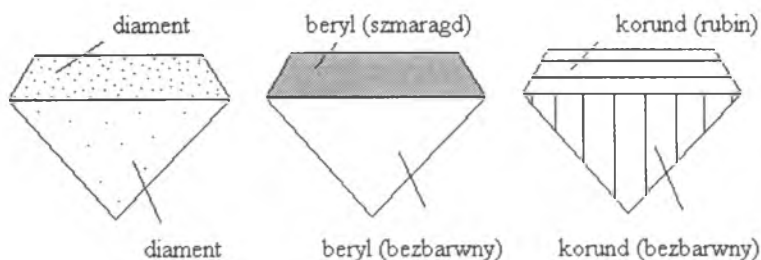
Rys. 210. Tryplet z efektem asteryzmu (gwiazdzistości) (wg R e a d a, 1991)

Obiekty złożone wykonuje się w taki sposób, by poszczególne składniki zespołu były niewyróżnialne okiem nieuzbrojonym, a obiekt sprawiał wrażenie jednolitego.

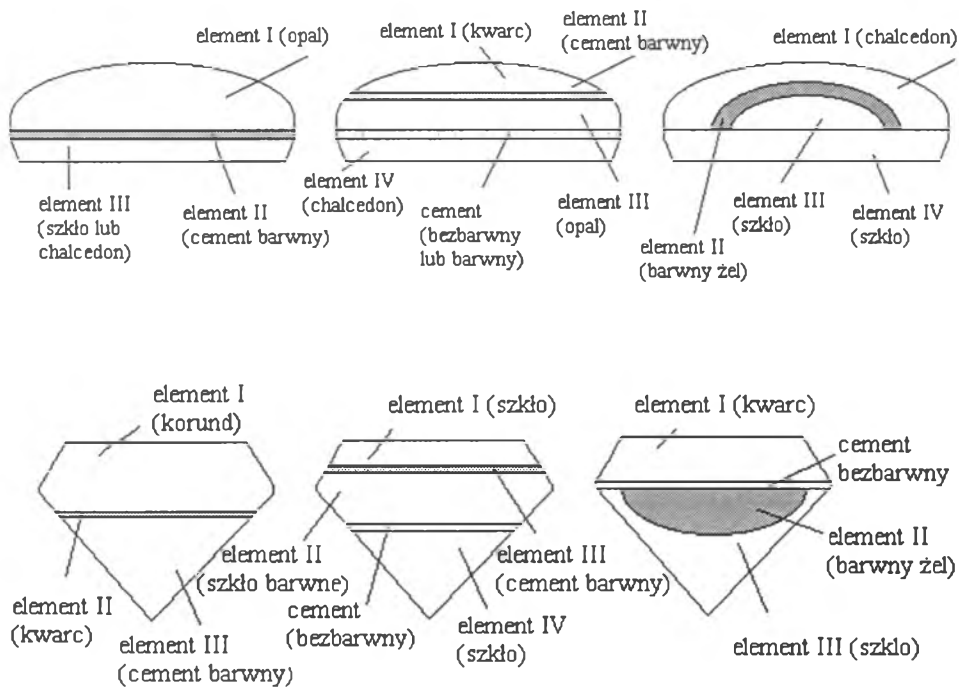
Obiekty składane wykonuje się z zamiarem:

- uzyskania obiektu o większych rozmiarach, czyli o nieproporcjonalnie większej wartości w porównaniu ze składającymi się nań elementami (rys. 211),
- polepszenia walorów estetycznych obiektu na drodze wzmocnienia lub wytworzenia barwy (rys. 212) oraz przez naśladowanie barwnych zjawisk optycznych (por. rys. 210),
- wytworzenia imitacji możliwie udanie naśladowującej naturalny pierwowiez (rys. 213); w tym celu używa się zarówno materiałów naturalnych, jak i syntetycznych.

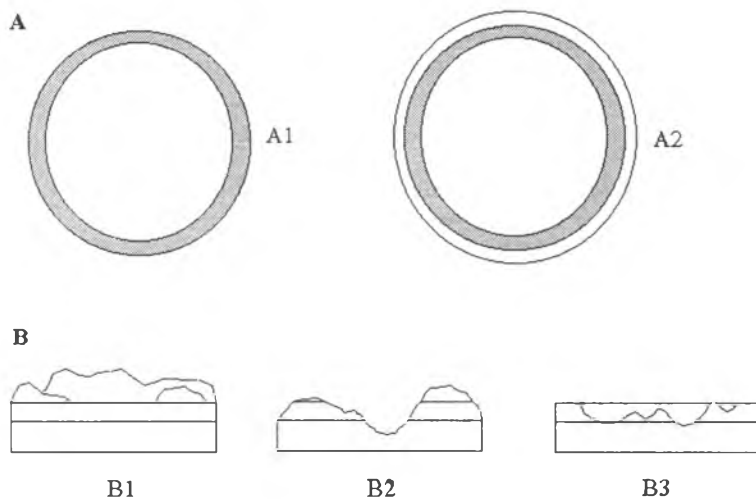
Kamienie składane tworzą od zarania dziejów (por. Plinius Gaius Secundus, 1845). Jednak okresem największej aktywności w tym zakresie był początek obecnego stulecia. Produkcja dubletów, trypletów i multipletów



Rys. 211. Dublety powstałe przez połączenie elementów tego samego materiału (tzw. dublety naturalne) (wg R e a d a, 1991)



Rys. 212. Tryplety i multiplety z wzmacnioną lub wytworzoną barwą (wg Reada, 1991)

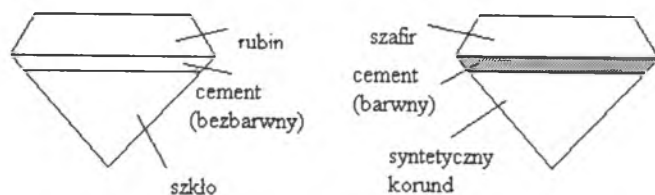


Rys. 213. Imitacje pereł (A) oraz kamei i intaglio (B) (wg Reada, 1991)
A1 — powłoka szklana wypełniona materiałem imitującym właściwości optyczne perły naturalnej (przekrój), **A2** — powłoka plastikowa zabezpieczająca element **A1** (przekrój), **B1** — surowiec do produkcji kamei i intaglio (przekrój), **B2** — kamea (przekrój), **B3** — intaglio (przekrój)

gwałtownie się zmniejszyła wraz z postępem produkcji względnie tanich materiałów syntetycznych dobrze imitujących materiały naturalne, np. uzyskiwanych metodą Verneuila. Praktyka ta nie została jednak całkowicie zaniechana, szczególnie jeśli chodzi o materiały, których synteza jest nadal kosztowna (np. syntetyczny beryl — szmaragd otrzymywany metodą Czochralskiego). Dotyczy to również obiektów składanych, których produkcja ma za zadanie zwiększenie odporności na uszkodzenie materiałów naturalnych przeznaczonych do umieszczenia w ich oprawie np. płytek opalu szlachetnego, który jest umieszczany na nieprzezroczystej podstawie wykonanej z tworzywa sztucznego, a całość jest pokrywana warstwą celuloide lub szkła.

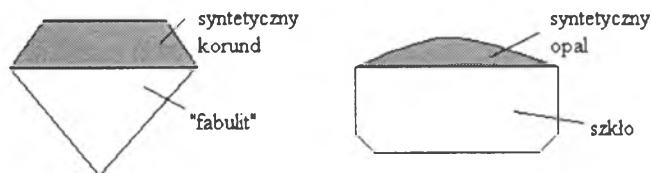
Zależnie od stopnia udziału materiału naturalnego wyróżnia się obiekty składane:

- „prawdziwe”, w których wszystkie elementy zespołu są pochodzenia naturalnego, a łączący je cement jest bezbarwny i niewidoczny dla oka nieuzbrojonego, np. dublet diament/diament, beryl/beryl, korund/korund (por. rys. 211),
- „fałszywe”, gdy najmniej jeden element zespołu nie jest pochodzenia naturalnego, np. dublet złożony z naturalnego rubinu i szkła oliwioowego barwy rubinowej lub tryplet złożony z naturalnego szafiru, syntetycznego korundu i barwionego cementu (rys. 214),

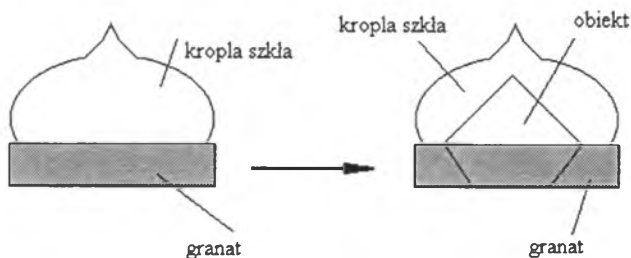
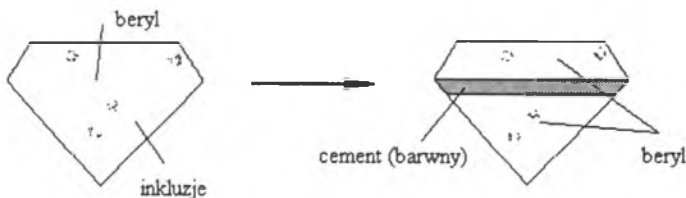


Rys. 214. Dublet i tryplet półnaturalny (wg Reada, 1991)

- „sztuczne”, gdy wszystkie elementy zespołu są pochodzenia syntetycznego, np. dublet złożony z syntetycznego korundu i fabulitu czy też syntetycznego opalu i szkła (rys. 215), lub imitacje korundu (rubinu, szafiru), berylu (szmaragdu), diamentu, kwarcu (ametystu), topazu i oliwину połączeniami syntetycznego „granatu” i odpowiednio barwionego szkła; w procedurze tej wykorzystuje się zjawisko adhezji stopu krzemianowego względem granatu (rys. 216).



Rys. 215. Dublety syntetyczne (wg Reada, 1991)

A**B**

Rys. 216. Dublet fałszywy (A) i prawdziwy (B) imitujące duży beryl (szmaragd)
(wg Reada, 1991)

Szczególną odmianą obiektów składanych są tzw. kamienie wydrążone, których wewnątrz górnej części obiektu jest wypełnione barwną cieczą (rys. 212).

W dubletach „prawdziwych” występują zwykle dwa kawałki tego samego surowca naturalnego połączone bezbarwnym cementem — np. diament/diament (por. rys. 211). Raczej do wyjątków należą połączenia kawałków różnych materiałów naturalnych, jak granatu i rubinu. W tego rodzaju obiektach dąży się do tego, by element bardziej eksponowany, jakim jest korona, górna część kaboszonu, miał korzystniejsze walory estetyczne. Podobnie postępuje się podczas sporządzania „prawdziwych” dubletów celem wykonania dwubarwnych kamei lub intaglio.

W dubletach „fałszywych” tylko korona lub górna część kaboszonu bywa wykonywana z naturalnego surowca, natomiast podstawa obiektu o nałożonym szlifie fasetkowym lub dolna część kaboszonu jest z surowca syntetycznego (por. rys. 212, 214). Podobnie postępuje się przy wykonywaniu „fałszywych” dwubarwnych kamei i intaglio.

Najczęściej spotykane dublety sporządza się z zamiarem naśladowania obiektów wykonanych z naturalnego: opalu, granatu (piropu, grossularu-tsaworytu, andradytu-demantoidu, almandynu), berylu (szmaragdu, akwamarynu, goszenitu), korundu (rubinu, szafiru), a rzadziej, by naśladować obiekty wykonywane z naturalnego: chryzoberylu (aleksandrytu), topazu, cyrkonu, spinelu, diamentu, kwarcu (cytrynu, ametystu) i jadeitu.

Dużą różnorodność wykazują również tryplety i multiplety. Przez analogię z dubletami można wśród nich wydzielić obiekty „prawdziwe”, „fałszywe” 263

i „sztuczne”. W obiektach złożonych z większej liczby elementów spotyka się także wydrążenia wypełniane barwną substancją płynną lub galaretowatą, np. żelatyną (por. rys. 212). Multipletowy charakter mają także naśladownictwa wielobarwnych kamei i intagliów (por. rys. 213).

Szczególnym przykładem multipletów bywają imitacje o pokroju sferycznym, np. imitacje pereł (por. rys. 213). Wykonuje się je przez wypełnienie przezroczystego, szklanego, ceramicznego lub plastikowego jądra, pustego wewnątrz, masą złożoną ze zmielonej macicy perłowej, czy rybich łusek i zabezpiecza od zewnątrz przezroczystą powłoką, np. plastikową. Inna metoda polega na nakładaniu warstw substancji perłopodobnej na szklane, ceramiczne lub plastikowe jądro i zabezpieczeniu ich od zewnątrz przezroczystą powłoką plastikową.

Dość specyficznym rodzajem obiektów złożonych są produkty otrzymywane na drodze sprasowywania lub sklejanego drobnych kawałków czy sproszkowanego surowca naturalnego w większą całość (tzw. obiekty rekonstruowane) często w warunkach podwyższonej temperatury, np. prasowany bursztyn. Surowiec tego rodzaju bywa dodatkowo waloryzowany przez wprowadzenie do jego wnętrza charakterystycznych inkluzji celem możliwie największego upodobnienia do surowca naturalnego.

Tryplety, kwadruple i multiplety na ogół wykonuje się z zamiarem naśladowania obiektów wykonywanych z naturalnego opalu, berylu (szmaragdu, goszenitu, akwamarynu). Rzadziej ich przeznaczeniem jest imitowanie obiektów wykonanych z naturalnego: korundu (rubinu, szafiru), spinelu, turmalinu, oliwinu, cyrkonu, zoizytu (tanzanitu), granatu (piropu, grossularu-tsaworytu, almandynu), kwarcu (ametystu) czy też jadeitu.

W celu odróżnienia obiektów jednoelementowych od naśladowujących je obiektów wieloelementowych (dubletów, trypletów, kwadrupli i multipletów) bierze się pod uwagę następujące cechy:

- kontrastowe zmiany charakteru inkluzji pomiędzy poszczególnymi częściami obiektu gemmologicznego, np. między koroną i podstawą obiektu,
- brak inkluzji w niektórych częściach obiektu gemmologicznego, np. w koronie lub podstawie czy w warstwie rondystowej obiektu,
- obecność powierzchni spójnienia (płaskich, wklęsłych, wypukłych) w obiekcie złożonym,
- wygląd powierzchni spójnienia obiektu złożonego, a zwłaszcza występowanie wzdłuż nich zdeformowanych lub nie zdeformowanych pęcherzyków powietrza oraz widoczny pod pewnym kątem charakterystyczny sposób odbijania przez nie światła, np. lustrzany,
- kontrast własności fizycznych elementów składowych obiektu złożonego, np. barwy, fluorescencji, współczynnika refrakcji, izo- i anizotropii, adhezji,
- występowanie bardzo cienkich elementów typu warstwowego obecnych we wnętrzu obiektu bądź na jego powierzchni, np. warstewki pokrywającej tafłę obiektu, czy warstewki występującej w płaszczyźnie rondysty.

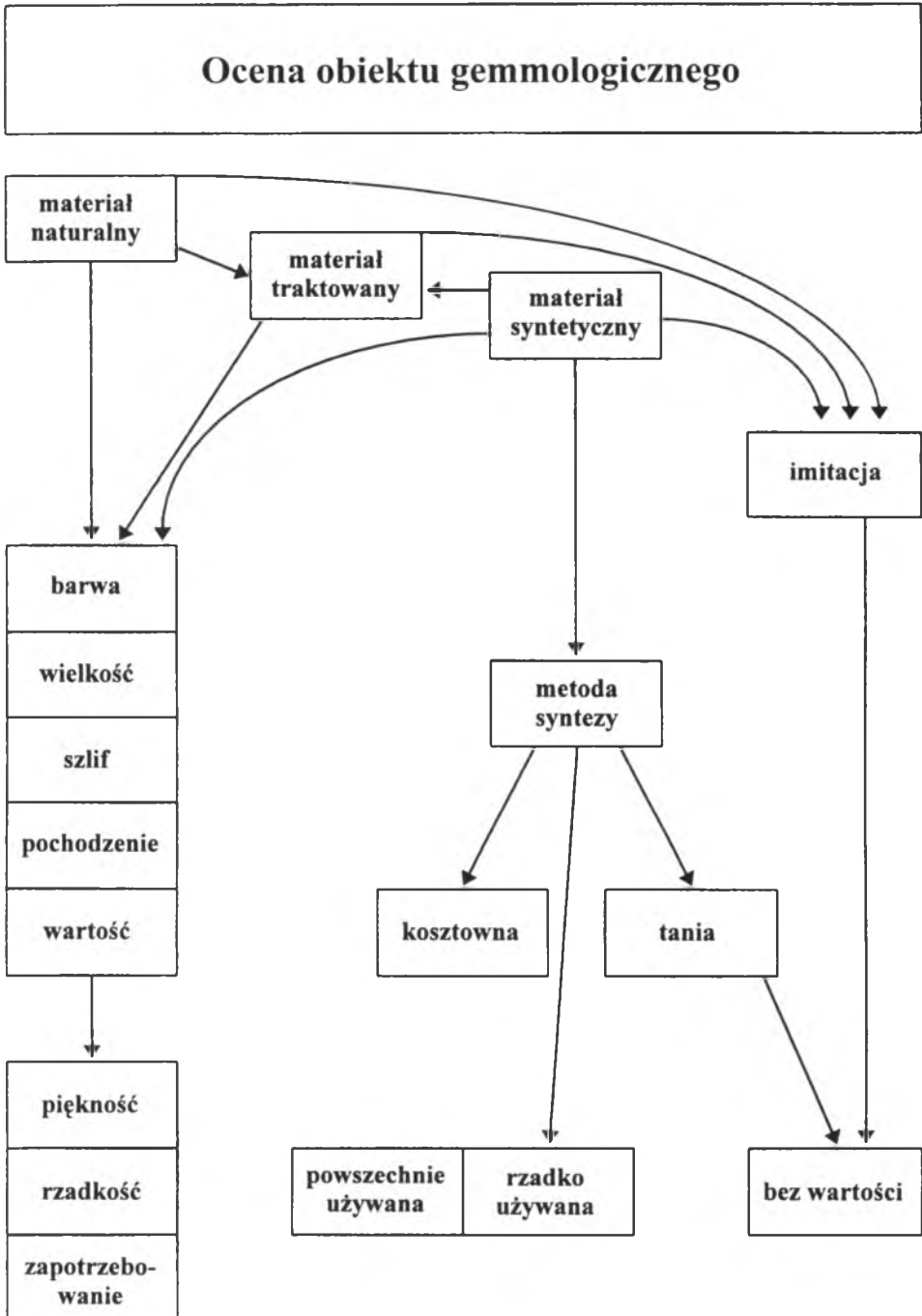
Aby stworzyć korzystne warunki obserwacji cech obiektów wieloelementowych, umieszcza się je w środowisku o podobnym współczynniku załamania światła celem likwidacji zjawisk optycznych zachodzących na granicy obserwowanego obiektu i otaczającego środowiska, np. w jodku metylenu. Po zastosowaniu dostatecznego powiększenia możliwe jest zauważenie różnic własności optycznych elementów składających się na obiekt złożony, np. różnic barwy, typu inkluzji oraz obserwacyjne stwierdzenie przebiegu powierzchni ich spojenia.

9. Laboratorium gemmologiczne

W większości państw obrót materiałami i obiektami gemmologicznymi odbywa się według reguł chronionych specjalnymi przepisami prawnymi. Żeby prawo było stosowane i przestrzegane, potrzebne jest wykrywanie wszelkich anomalii, niedokładności lub oszustw w zakresie obrotu tymi materiałami i obiektami. Kluczową rolę mają tu do odegrania laboratoria gemmologiczne.

Jednym z podstawowych zadań laboratoriów gemmologicznych jest wypracowywanie obiektywnych kryteriów oceny materiału lub obiektu gemmologicznego. Jednak są one w części subiektywne i polegają na indywidualnym poczuciu estetyki znawcy obiektów gemmologicznych, np. piękność obiektu (schemat 1). Niektóre procedury pozyskiwania i obróbki materiałów gemmologicznych identyfikuje się na podstawie informacji zapisanych w postaci stosunkowo łatwo czytelnych śladów czy właściwości, np. charakterystycznych inkluzji, czy określonego typu zonalności. Wykrycie innych wymaga stosowania kosztownych instrumentów badawczych i wielostronnych procedur identyfikacyjnych, jak np. analizy spektralnej różnych widm, czy też mikroskopii elektronowej. W rezultacie nabywca obiektu lub materiału gemmologicznego powinien mieć całkowitą pewność, że posiadany przezeń obiekt ma właściwości odpowiadające jego cenie. Pewność taka jest podstawową zasadą, na której powinien się opierać właściwie funkcjonujący obrót surowcami i obiektami gemmologicznymi. Brak tej pewności w dość szybkim czasie, raczej wcześniej niż później, zdegraduje rynek. Taką pewność daje tylko certyfikat gemmologiczny posiadający jednocześnie walor gwarancji handlowej. W wielu krajach wydawaniem certyfikatów zajmują się wyspecjalizowane w tym kierunku laboratoria gemmologiczne reprezentowane prawnie przez uprawnionych rzeczoznawców. Podstawą do wydania certyfikatu jest ekspertyza gemmologiczna (rys. 217). Zakres badań potrzebnych do przedstawienia ekspertyzy określany jest indywidualnie zależnie od charakteru obiektu i złożonego zapotrzebowania.

Kryteria oceny obiektu gemmologicznego



9.1. Gromadzenie danych gemmologicznych

Identyfikacja obiektu lub surowca gemmologicznego wymaga zwykle zebrania wielu różnych informacji, które muszą być jednocześnie porównane ze standardowymi właściwościami określonych materiałów. Wszystko to wymaga kompletacji i uporządkowania wiadomości o materiałach i obiektach gemmologicznych. Ich ciągle systematyzowanie i kompletowanie jest nieodzowną czynnością praktyki gemmologicznej. Podobnego uporządkowania i standaryzacji domaga się również informacja o obiekcie gemmologicznym przekazywana jego nabywcy.

Dla prawidłowego przedstawiania wyników badań i oznaczeń gemmologicznych niezbędna jest znajomość zasad nazewnictwa obowiązującego w obrocie handlowym materiałami gemmologicznymi. W krajach zachodnioeuropejskich stosowane są ujednolicone zasady nazewnictwa zawarte w przepisach CIBJO (Międzynarodowe Zrzeszenie Bizuterii, Jubilerstwa, Złotnictwa, Diamentów, Perel i Kamieni Szlachetnych z siedzibą w Hadze).

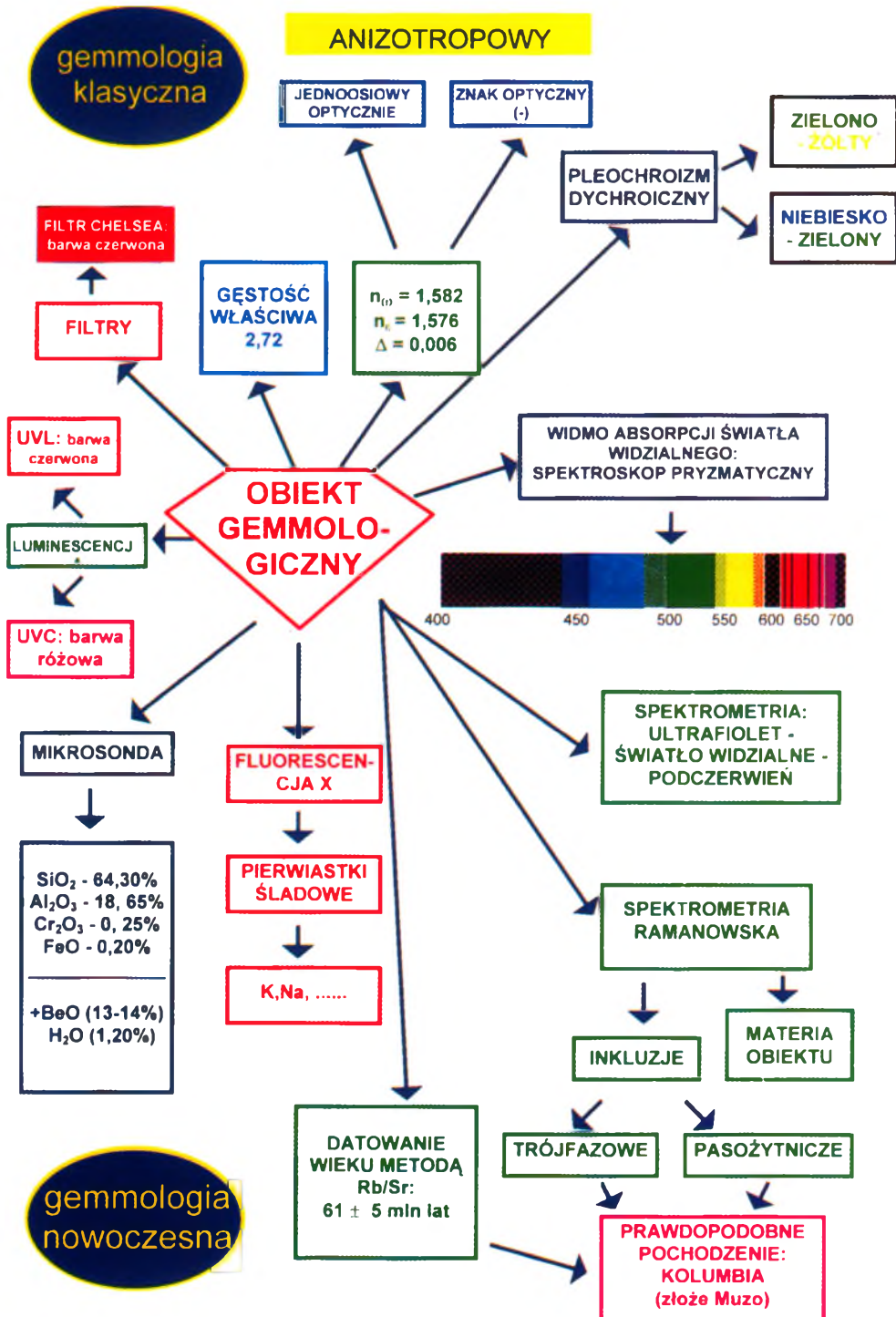
Najistotniejsze punkty tych postanowień stwierdzają, że:

- dozwolone jest używanie jedynie nazw handlowych zawartych w spisie nazw,
- nazwy muszą być podawane kompletnie i bez skrótów,
- dozwolone jest stosowanie nazw mineralogicznych zamiast handlowych,
- nazwa powinna jednoznacznie określać obiekt gemmologiczny,
- obiekty poprawiane, składane, rekonstruowane czy zmieniane w różny sposób muszą mieć to zadeklarowane w nazwie,
- nazwa „brylant” bez dodatkowych określeń oznacza diament o szlifie brylantowym,
- specjalny efekt optyczny wykazywany przez obiekt powinien być zawarty w nazwie w formie przymiotnika, np. korund (rubin) gwiaździsty,
- materiały syntetyczne muszą mieć to zaznaczone w nazwie z ewentualnym dołączeniem informacji o wytwórni,
- imitacje powinny być jednoznacznie określone nazwą użytego materiału, np. plastikowa imitacja koralu.

Wyniki badań gemmologicznych mogą być przedstawiane w rozmaitej formie. Zależy to głównie od:

- celu badania,
- wymagań zleciennodawcy.

Zestawy informacji o konkretnych obiektach i materiałach gemmologicznych przybierają zwykle formę tzw. kart danych lub różnych metryczek. Natomiast standaryzowane zestawy informacji o wszelkich surowcach gemmologicznych mają formę tzw. banków danych (baz danych).



Rys. 217. Ekspertyza gemmologiczna berylu (szmaragdu) (wg Ł a s n i e r a: mat. nie publikowane, 1996)

9.1.1. Karty danych

Uporządkowany w formie formularza zbiór najważniejszych właściwości i parametrów uzyskiwanych podczas ekspertyzy obiektu lub surowca gemmologicznego nazywany jest jego kartą danych. Może ona ograniczać się do pewnego zakresu lub wycinka właściwości (rys. 218) lub też obejmować zestawione syntetycznie całe spektrum jego właściwości (tab. 30). Niektóre karty danych rozbudowywane są w taki sposób, że obejmują swym zasięgiem informacje pozyskiwane w wyniku bardzo specjalistycznych, wyrafinowanych badań z wykorzystaniem kosztownej aparatury (tab. 31).

Większość wzorów kart danych jest przygotowywana na użytek określonych laboratoriów gemmologicznych i ma konfigurację odpowiadającą prowadzonym w nich badaniom. Istnieją również wzory kart danych o szerszym rozpowszechnieniu, których standaryzowany zestaw informacji odpowiada potrzebom i kryteriom stosowanym przez jednostki lub organizacje gemmologiczne o szerszym zasięgu, np. karta danych Francuskiego Towarzystwa Gemmologicznego (tab. 32).

Odczyt (pozycja)	Wykres odczytu	Rezultat																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="padding: 2px;">0°</th> <th style="padding: 2px;">45°</th> <th style="padding: 2px;">90°</th> <th style="padding: 2px;">135°</th> <th style="padding: 2px;">Inny</th> </tr> <tr><td style="height: 20px;"></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td style="height: 20px;"></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	0°	45°	90°	135°	Inny											<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="padding: 2px;">0°</th> <th style="padding: 2px;">45°</th> <th style="padding: 2px;">90°</th> <th style="padding: 2px;">135°</th> <th style="padding: 2px;">Inny</th> </tr> <tr><td style="height: 20px;"></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td style="height: 20px;"></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td style="height: 20px;"></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	0°	45°	90°	135°	Inny																<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="padding: 2px;">n:</td></tr> <tr><td style="padding: 2px;">Δ:</td></tr> <tr><td style="padding: 2px;">(+,-):</td></tr> </table>	n:	Δ:	(+,-):
0°	45°	90°	135°	Inny																																				
0°	45°	90°	135°	Inny																																				
n:																																								
Δ:																																								
(+,-):																																								
Odczyt (pozycja)	Wykres odczytu	Rezultat																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="padding: 2px;">0°</th> <th style="padding: 2px;">45°</th> <th style="padding: 2px;">90°</th> <th style="padding: 2px;">135°</th> <th style="padding: 2px;">Inny</th> </tr> <tr><td style="height: 20px;"></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td style="height: 20px;"></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	0°	45°	90°	135°	Inny											<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="padding: 2px;">0°</th> <th style="padding: 2px;">45°</th> <th style="padding: 2px;">90°</th> <th style="padding: 2px;">135°</th> <th style="padding: 2px;">Inny</th> </tr> <tr><td style="height: 20px;"></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td style="height: 20px;"></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td style="height: 20px;"></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	0°	45°	90°	135°	Inny																<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="padding: 2px;">n:</td></tr> <tr><td style="padding: 2px;">Δ:</td></tr> <tr><td style="padding: 2px;">(+,-):</td></tr> </table>	n:	Δ:	(+,-):
0°	45°	90°	135°	Inny																																				
0°	45°	90°	135°	Inny																																				
n:																																								
Δ:																																								
(+,-):																																								
Odczyt (pozycja)	Wykres odczytu	Rezultat																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="padding: 2px;">0°</th> <th style="padding: 2px;">45°</th> <th style="padding: 2px;">90°</th> <th style="padding: 2px;">135°</th> <th style="padding: 2px;">Inny</th> </tr> <tr><td style="height: 20px;"></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td style="height: 20px;"></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	0°	45°	90°	135°	Inny											<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="padding: 2px;">0°</th> <th style="padding: 2px;">45°</th> <th style="padding: 2px;">90°</th> <th style="padding: 2px;">135°</th> <th style="padding: 2px;">Inny</th> </tr> <tr><td style="height: 20px;"></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td style="height: 20px;"></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td style="height: 20px;"></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	0°	45°	90°	135°	Inny																<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="padding: 2px;">n:</td></tr> <tr><td style="padding: 2px;">Δ:</td></tr> <tr><td style="padding: 2px;">(+,-):</td></tr> </table>	n:	Δ:	(+,-):
0°	45°	90°	135°	Inny																																				
0°	45°	90°	135°	Inny																																				
n:																																								
Δ:																																								
(+,-):																																								

Rys. 218. Karta podstawowych danych optycznych uzyskiwanych refraktometrycznie
 n — współczynnik refrakcji, Δ — dwójłomność, (+, -) — znak optyczny

Karta danych używana w Laboratorium Gemmologicznym Uniwersytetu w Nantes

Nazwa zlecenia:		Data:		Rezultat:	
Obiekt:	seria:	nr	nomenklatura C.I.B.J.O.		
		obserwacje:	szkic obiektu:		
Wielkość:		— okiem			
Szlif:		— lupa 10 ×			
Proporcje:		— binokulem			
Barwa:		— mikroskopem			
Przejroczystość:		— impersjoskopem			
Poler:		stan krawędzi:			
Natura inkluzji: stałe		<input type="checkbox"/> typowe <input type="checkbox"/> nietypowe — i/lub ciekłe — jedofazowe — dwufazowe — trójfazowe			
Błędy:		strefy wzrostu (zonalność):			
★ asteryzm	kocie oko		opalescencja		efekt aleksandrytu
Polaryskop	<input type="checkbox"/> izotropowy	<input type="checkbox"/> anizotropowy	<input type="checkbox"/> agregat polikrystaliczny	<input type="checkbox"/> anomalie optyczne	
Konoskop	brak figur interferencyjnych	figury krysz. jednoosiowego	figury krysz. dwuosiowego	znak optyczny	
Współczynnik refrakcji [n]	przewodnictwo ciepła: silne średnie słabe				
Refraktometr	tafla		podstawa / korona	współczynniki	
				n_1	
				n_{α}	
				n_2	
				n_{β}	
				n_3	
Dwójłomność (Δ)				dyspersja	brak słaba umiarkowana silna
Charakter optyczny	<input type="checkbox"/> jednoosiowy	<input type="checkbox"/> dwuosiowy	<input type="checkbox"/> izotropowy	znak optyczny	<input type="checkbox"/> + <input type="checkbox"/> -
Pleochroizm (dychroskop)	brak umiark.	barwa pleochr.	filtr Chesea		
	słaby silny	<input type="checkbox"/> n_z <input type="checkbox"/> n_{β} <input type="checkbox"/> n_{γ}	efekt aleksandrytu	światło nat.:	światło szt.:
Spektroskop	widmo absorpcyjne:		gęstość właściwa		
			metoda		
Luminescencja	UVL	brak umiark.	słaby silny	barwa lum.:	
	UVC	brak umiark.	słaby silny	barwa lum.:	
Mikrorefleksometr [n]			Wykonał:		

Karta danych obiektu gemmologicznego

Materiał:		Odmiana:	
Klient:		Data przyjęcia:	
		Data wydania:	
Nr katalogowy:		Metoda zwrotu:	
Ciężar obiektu (karty):		Średnica [mm]:	
Szlif:		Rozmieszczenie barwy:	
Barwa:			
Pleochroizm:		Reakcja na filtry:	
Znak optyczny:			
Współczynnik załamania światła:		Dwójłomność:	
Gęstość właściwa:			
Mikroskop optyczny (binokular):			
Obserwacja przy skrzyżowanych polaroidach:			
Luminescencja w ultrafiolecie:			
UVL		UVC	
Intensywność: brak, słaba, umiarkowana, silna		brak, słaba, umiarkowana, silna	
Barwa:			
Rozmieszczenie:			
Fluktuacje:			
Fosforescencja:			
Luminescencja w świetle widzialnym:		Dyfuzja: O/N	
Barwa:			
Intensywność: brak, słaba, umiarkowana, silna			
Spektroskop ręczny:			
Światło przechodzące:		Temperatura:	
Światło odbite:			
Spektrometry:			
UV		ŚWIATŁO WIDZ.	
		PODCZERWIEŃ	
Fluorescencja rentgenowska:			
Spektrometr laserowy Ramana:			
Radioaktywność:			
Fotografia:		Mikro:	Makro:
Inne:			
Rezultat / komentarz:			

Karta danych Francuskiego Towarzystwa Gemmologicznego

Association Française de Gemmologie		<h1 style="margin: 0;">AFG</h1>	Nr katalog.
Charakterystyka: Układ krystalograficzny: _____ Polaryskop: _____ Współczynnik refrakcji: _____ Charakter optyczny: _____ Znak optyczny: _____ Dwójłomność: _____ Dyspersja: _____ Pleochroizm: _____ Filtry: _____ Widmo: _____ <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">  </div>			
Fluorescencja:		UVL UVC	_____ _____
Gęstość właściwa: Twardość:		_____ _____	
Barwa:	Forma:	Materiał:	
Ciężar obiektu:	Wielkość (średnica):	Odmiana:	
Stan zewnętrzny:			
Inkluzje:		Rysunek układu inkluzji:	
Obserwacje:			

9.1.2. Banki danych

Stale wzrastająca ilość informacji o surowcach i obiektach gemmologicznych skłoniła do opracowania wielu różnych katalogów, w których zebrano standardowe dane o materiałach gemmologicznych. Początkowo były to przeważnie tabelaryczne zestawienia informacji uporządkowane według różnych kryteriów, np. według porządku alfabetycznego nazwy, według rosnącej wartości współczynnika załamania światła, według rosnącej gęstości właściwej, według rosnącej twardości. W zestawieniach tych uwzględniano bądź jedno kryterium porządkujące, bądź większą ich liczbę w różnym układzie nadrzędności, np. przez jednoczesne uwzględnienie twardości, barwy, gęstości właściwej, czy współczynnika załamania światła. Zestawienia takie są integralną częścią większości starszych podręczników i atlasów gemmologicznych (Webster 1976; Schuman, 1976).

Rozwój metod numerycznych, a szczególnie powszechna dostępność komputerów osobistych dużej mocy, umożliwiły wprowadzenie do powszechnej praktyki komputerowych banków danych (baz danych). Do ich coraz to większej popularności i użyteczności przyczynił się rozwój Internetu. Dzięki tej sieci możliwe jest niemal natychmiastowe rozpowszechnianie skorygowanych informacji poprzez stałą aktualizację baz danych dostępnych jej użytkownikom.

Komputerowe bazy danych gemmologicznych przeznaczone do użytkowania w komputerach osobistych opracowano dotychczas w kilku krajach.

Jedną z najstarszych i najbardziej znanych baz danych, opracowanych w języku angielskim, jest program GemData. Został on sporządzony przez znanego gemmologa angielskiego i autora podręczników gemmologicznych P. Reada. Najstarsze wersje tej bazy danych stanowią programy:

A. Program GemData I składający się z trzech części. Pierwsza część zawiera zbiór nazw materiałów gemmologicznych indeksowany kolejnymi liczbami naturalnymi. Indeks ten jest używany do wyszukiwania i wyświetlania na ekranie monitora informacji o poszczególnych materiałach gemmologicznych. Każdy materiał jest scharakteryzowany takimi czynnikami, jak:

- współczynnik załamania światła,
- dwójłomność,
- dyspersja,
- gęstość właściwa,
- twardość,
- wzór chemiczny,
- układ krystalograficzny,
- charakter optyczny (znak optyczny),
- połysk,
- łupliwość,
- barwa (z uwzględnieniem wszystkich wariantów barwy).

Druga część programu składa się z tabelarycznych zestawień materiałów gemmologicznych uporządkowanych według różnych kryteriów, takich jak porządku alfabetycznego nazwy czy według rosnącego współczynnika załamania światła. W zestawieniach tych uwzględnia się również inne parametry materiału, np.: dwójłomność, dyspersję, gęstość właściwą, twardość. Trzecia część programu służy do dokonywania porównań parametrów określonego materiału gemmologicznego z danymi podobnych materiałów. Informacje te wyszukuje się na podstawie indeksu materiału. Wyświetlane są razem z danymi materiałów o zbliżonych właściwościach.

B. Program GemData 2 umożliwia dokonywanie identyfikacji materiału gemmologicznego, porównując zebrane o nim informacje wprowadzane do komputera przez użytkownika programu z danymi zapisanymi w programie. Informacje wprowadzane przez użytkownika programu nie muszą być kompletne, a zakres parametrów, na podstawie których przeszukiwana jest baza danych zapisana w pamięci komputera, może być, zależnie od potrzeb czy oczekiwań użytkownika, poszerzony lub zawężony. Głównymi parametrami uwzględnianymi w tej części programu GemData są:

- współczynnik załamania światła,
- dwójłomność,
- gęstość właściwa.

Najnowsza wersja bazy danych GemData jest dostępna w Internecie.

Podobny charakter ma baza danych gemmologicznych opracowana przez J.-P. Chalaina, a znana pod nazwą GemBase. Jest to pierwszy tego rodzaju i tak rozległy program użytkowy opracowany w języku francuskim. Może on być wykorzystywany zarówno przez profesjonalistów, jak i amatorów. Baza danych uwzględnia ponad 200 różnych materiałów, a stosowane nazewnictwo jest w pełni zgodne z normami Międzynarodowego Zrzeszenia do Spraw Bizuterii, Jubilerstwa, Złotnictwa, Diamentów, Perł i Kamieni Szlachetnych (CIBJO). W banku danych zgromadzono blisko milion informacji w różnej postaci.

Program ten można użytkować na dwa sposoby.

- Wariant 1: przez wybranie z listy nazwy określonego materiału i wyświetlenie na ekranie monitora kompletu informacji zawartych w pamięci komputera.
- Wariant 2: przez wprowadzenie do pamięci komputera posiadanych informacji o materiale lub obiekcie identyfikowanym i nakazanie przeszukania bazy danych celem wyszukania materiałów o wskazanych parametrach. Im pełniejsza będzie lista danych o identyfikowanym obiekcie, tym odpowiedź komputera będzie ściślejsza i zawierać będzie mniejszy zestaw możliwości.

Głównymi parametrami identyfikującymi obiekt są:

- współczynnik załamania światła,
- dwójłomność,
- gęstość właściwa,

- znak optyczny,
- barwa,
- przezroczystość.

Z uwzględnianiem współczynnika załamania światła i gęstości właściwej możliwe jest zawężanie lub poszerzanie zakresu przeszukiwania bazy danych. W rezultacie daje to odpowiednio większą lub mniejszą liczbę materiałów branych pod uwagę w procesie identyfikacji.

W języku niemieckim zostały opracowane dotychczas komputerowe bazy danych o szerszym profilu przeznaczone głównie dla mineralogów, np.: Die Lapis-Mineralogische Datenbank, Lithos-Mineralienprogramm. W pewnym stopniu mogą one być wykorzystywane na potrzeby gemmologiczne, lecz są mniej dogodne w użytkowaniu.

9.2. Klasyfikacja laboratoriów gemmologicznych

Konieczność określania natury materiałów i obiektów gemmologicznych, potrzeba wykrywania ingerencji człowieka w materiały naturalne i sposobów tej ingerencji (traktowania), konieczność rozpoznawania i identyfikacji materiałów syntetycznych, imitacji o różnej, nieraz doskonałej jakości zmuszają do używania coraz to bardziej specjalistycznego sprzętu badawczego. Niestety nie wszystkie laboratoria gemmologiczne mogą nadążyć za dokonującym się nieustannie postępowaniem w tej dziedzinie. Wynika to z różnych przyczyn, przeważnie jednak natury finansowej (bardzo wysokie ceny wysoce specjalistycznego sprzętu badawczego). W rezultacie spowodowało to rozwarstwienie możliwości badawczych istniejących laboratoriów gemmologicznych. Dotyczy to zarówno poziomu i jakości sprzętu badawczego, którym dysponują poszczególne laboratoria, jak i poziomu merytorycznego zatrudnionego w nich personelu, co prowadzi nieuchronnie do kategoryzacji laboratoriów gemmologicznych szczególnie z punktu widzenia możliwości wykonywania określonych badań (tab. 33).

Podstawowym typem laboratorium gemmologicznego, jednocześnie najbardziej rozpowszechnionym i dostępnym, jest laboratorium wykorzystujące doświadczenie i wiedzę swojego personelu wspartą podstawowymi instrumentami badawczymi (laboratorium kategorii B lub C; tab. 33), jako że większość badań identyfikacyjnych może być wykonana względnie tanim sposobem za pomocą niedrogiego sprzętu, przeważnie optycznego, np. refraktometru, dychroskopu, wagi hydrostatycznej, cieczy ciężkich, binokularu gemmologicznego, lampy rtęciowej, spektroskopu. W sytuacjach niepewności laboratorium takie może się odwołać do pomocy jednostek lepiej wyposażonych lub do laboratoriów wysoce specjalistycznych (laboratorium kategorii A, tab. 33), których z natury rzeczy nie jest wiele. Dysponują nimi większe organizacje gemmologiczne lub niektóre ośrodki uniwersyteckie.

Standaryzacja laboratoriów gemmologicznych

Laboratorium gemmologiczne		
Klasa A	Klasa B	Klasa C
Spektrometr laserowy ramanowski	binokular gemmologiczny	binokular gemmologiczny
Spektrometr ultrafioletu	mikrofotografia	waga (dokładność — 0,000001 g)
Spektrometr podczerwieni	waga (dokładność — 0,000001 g)	komparator barw
Spektrometr rentgenowski	filtry	polaryskop
Fluorescencja rentgenowska	komparator barw	refraktometr
Katodoluminescencja	polaryskop	spektroskop przyzmatyczny lub siatkowy
Mikroskop elektronowy	refraktometr	dychroskop
Mikrosonda	spektroskop przyzmatyczny lub siatkowy	licznik Geigera
Binokular gemmologiczny	dychroskop	
Mikrofotografia	perłoskop	
Waga (dokładność 0,000001 g)	licznik Geigera	
Kolorymetr	personel o kwalifikacjach uprawnionego gemmologa (dyplom gemmologiczny)	
Filtry		
Polaryskop		
Refraktometr		
Spektroskop przyzmatyczny lub siatkowy		
Dychroskop		
Perłoskop		
Licznik Geigera		
Komparator barw		
Personel o najwyższych kwalifikacjach z zakresu fizyki ciała stałego i gemmologii		

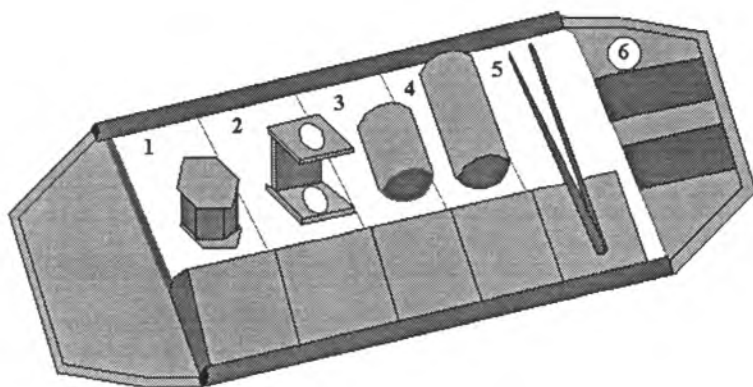
9.2.1. Laboratorium walizkowe (przenośne)

Firmy produkujące sprzęt gemmologiczny oferują zestawy przenośne o różnym stopniu kompletacji. Niektóre z nich są tak zestawione, że można je określić mianem podręcznych laboratoriów przenośnych.

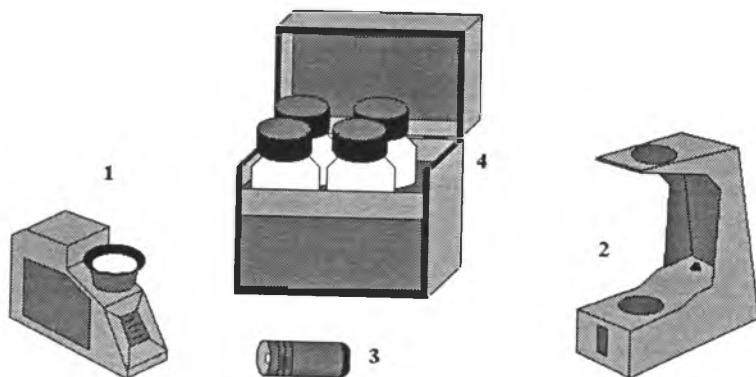
Najprostsze zestawy przenośne składają się z:

- kieszonkowej wersji polaryskopu,
- spektroskopu kieszonkowego,
- dychroskopu,
- lupy o dziesięciokrotnym powiększeniu,
- pincety.

Całość sprzętu zapakowana jest w poręczny, elastyczny futerał (rys. 219).



Rys. 219. Zestaw podręczny do podstawowych badań optycznych obiektów gemmologicznych
1 — lupa gemmologiczna (10 x), 2 — polaryskop, 3 — dychroskop, 4 — spektroskop, 5 — pinceta, 6 — futerał



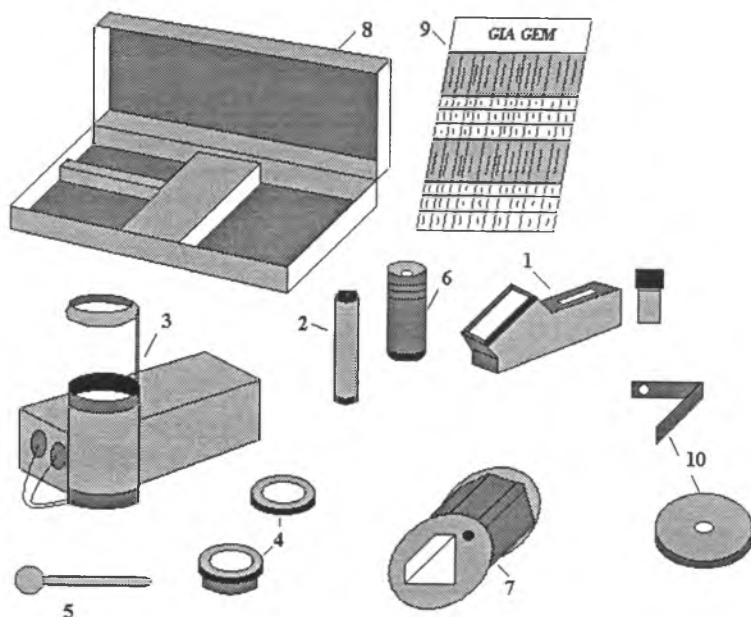
Rys. 220. Zestaw podręczny do podstawowych badań optycznych obiektów gemmologicznych
1 — refraktometr, 2 — polaryskop z konoskopem, 3 — dychroskop kalcytowy, 4 — zestaw cieczy ciężkich do określania gęstości właściwej

Nieco bogatsze wyposażenie ma zestaw proponowany przez GIA GEM Instruments w wersji zawierającej (rys. 220):

- refraktometr wyposażony w filtr polaryzacyjny i ciecz kontaktową o wysokim współczynniku załamania światła,
- polaryskop wyposażony w konoskop (sferę interferencyjną),
- dychroskop kalcytowy,
- zestaw cieczy ciężkich do określania gęstości właściwej.

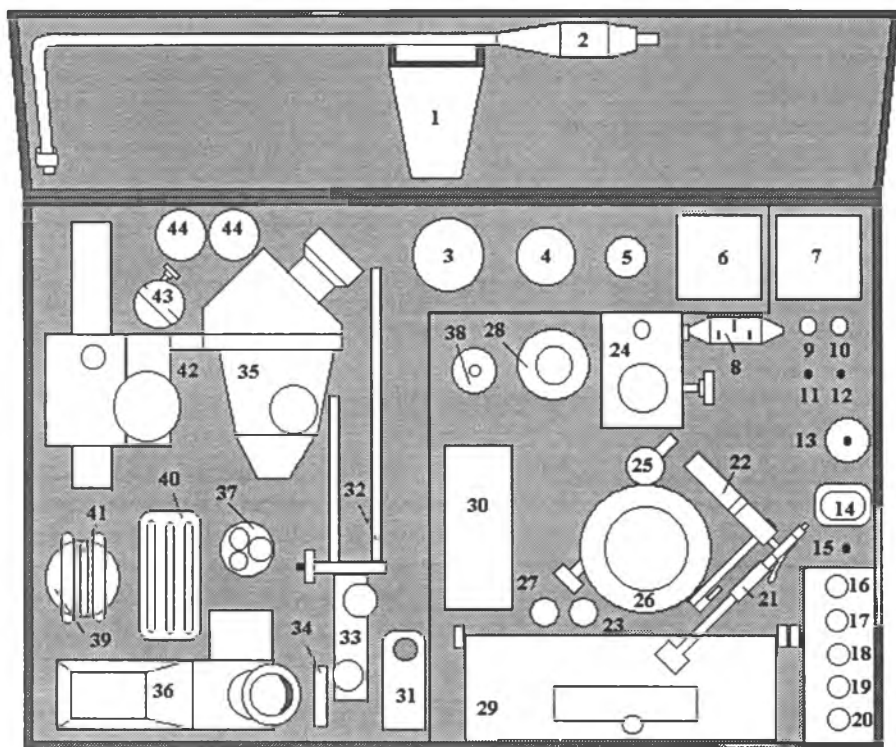
Jeszcze bogatsze wyposażenie zawiera laboratorium kieszonkowe oferowane pod nazwą „PocketLab” (rys. 221), w którego zestawie występują:

- refraktometr wraz z cieczą kontaktową o wysokim współczynniku załamania światła i tabelami wartości wzorcowych współczynnika załamania światła dla częściej spotykanych materiałów gemmologicznych,
- kieszonkowy spektroskop siatkowy,
- żarowe źródło światła o zasilaniu bateryjnym,
- filtr monochromatyczny (dysk aperturowy potrzebny do wytworzenia punkowego oświetlenia, wyposażenie do ciemnopolowego oświetlenia, uchwyt podtrzymujący),
- filtry polaryzacyjne (polaryzator i analizator), które wraz ze źródłem światła i uchwytem podtrzymującym umożliwiają utworzenie minipolaryskopu,



Rys. 221. Kieszonkowe laboratorium gemmologiczne

1 — refraktometr, 2 — spektroskop siatkowy, 3 — źródło światła, 4 — filtry polaryzacyjne, 5 — sfera interferencyjna, 6 — dychroskop kalcytowy, 7 — lupa gemmologiczna (10 x), 8 — futerał, 9 — zestaw współczynników załamania światła wybranych materiałów gemmologicznych, 10 — przysłona aperturowa i wyposażenie do wytwarzania oświetlenia ciemnopolowego



Rys. 222. Wyposażenie laboratorium przenośnego KA51KRS

1 — źródło światła o charakterystyce źródła typu „C”, 2 — światłowód, 3 — bromonaftalen, 4 — jodek metylenu, 5 — ciecz kontaktowa, 6 — komora imersyjna, 7 — wentylator, 8 — zasilanie 110/220 V, 9 — bezpiecznik, 10 — zasilanie 12 V, 11 i 12 — kontrolka zasilania, 13 — regulacja natężenia oświetlenia, 14—20 — wyłączniki różnych rodzajów oświetlenia, 21 — uchwyt badanego obiektu, 22 — uchwyt spektroskopu, 23 — zasilanie źródła światła typu „C”, 24 — mocowanie mikroskopu, 25 — mocowanie polaryskopu, 26 — polaryskop, 27 — zasilanie skali spektroskopu, 28 — źródło światła ultrafioletowego (UVL), 29 — osłona ultrafioletu, 30 — stanowisko refraktometru, 31 — spektroskop, 32 — dolne źródło światła typu „C”, 33 — stolik imersyjny, 34 — filtr polaryzacyjny refraktometru, 35 — binokular gemmologiczny, 36 — refraktometr, 37 — żarówka spektrometru, 38 — źródło światła ultrafioletowego (UVC), 39 — filtr polaryskopu, 40 — przewód zasilający 12 V, 41 — konoskop, 42 — przewód zasilający 220 V, 43 — stolik, 44 — okular

- sferyczna bryła interferencyjna pomocna w uzyskaniu konoskopu,
- dychroskop kalcytowy,
- lupa o dziesięciokrotnym powiększeniu i średnicy roboczej 18 mm, z korekcją aberracji sferycznej i chromatycznej,
- sztywny futerał.

Najbogatsze wyposażenie mają przenośne laboratoria walizkowe składające się zwykle z kilkudziesięciu elementów. Największe z tych elementów są transportowane jako przyrządy składane. W starszych wersjach takich zestawów brak jest jeszcze przeważnie binokularu gemmologicznego. W skład takiej wersji zestawu laboratoryjnego wchodzi najczęściej:

- refraktometr,
- polaryskop,
- podświetlacz,
- spektroskop przyzmatyczny,
- dychroskop,
- zestaw różnych filtrów i soczewek,
- pincety,
- lupy,
- zestaw cieczy ciężkich,
- liniowy przyrząd pomiarowy, np. suwmiarka tarczowa,
- katalog szlifów,
- katalog współczynników załamania światła ważniejszych materiałów gemmologicznych.

Nowsze zestawy laboratoriów przenośnych zawierają już mikroskop gemmologiczny (rys. 222). Jest to zwykle binokular dający kilkudziesięciokrotne powiększenia (ok. 10 do 50 razy). Refraktometr w standardowym wyposażeniu ma filtr sodowy służący wytworzeniu stosowanej w tego rodzaju badaniach długości fali światła monochromatycznego, a spektroskop przyzmatyczny wyposażony jest w skalę długości fal. Jeszcze nowocześniejszym laboratorium walizkowym jest zestaw oferowany przez GIA GEM Instruments. Jest to nieomal kompletne klasyczne laboratorium gemmologiczne umożliwiające profesjonalne wykonywanie podstawowej identyfikacji i oceny obiektów oraz surowców. Całość mieści się w stosunkowo niewielkiej, poręcznej walizce aluminiowej zamykanej kodowanym zamkiem.

Literatura

- Agricola G., 1546: *De Natura fossilium*. Basel.
- Anderson B. W., 1980: *Gem testing*. Butterworths, London.
- Anderson B. W., 1976: *Gemstones for everyman*. Faber and Faber, London.
- Arem J. E., 1987: *Color encyclopedia of gemstones*. Van Nostrand, New York.
- Bank H., 1973: *From the world of gemstones*. Pinguin, Innsbruck.
- Bariand P., Poirot J. P., 1985: *Larousse des pierres précieuses*. Librairie Larousse, Paris.
- Bauer M., 1968: *Precious stones*. Dover Publications, New York.
- Betiechtin A. G., 1971: *Lehrbuch der speziellen Mineralogie*. Leipzig.
- Boulliard J. C., 1996: *Et l'homme créa la pierre*. Univ. P. M. Curie, Paris.
- Bolewski A., Manecki A., 1993: *Mineralogia szczegółowa*. Wyd. Geol., Warszawa.
- Bolewski A., Kubisz J., Manecki A., Żabiński W., 1990: *Mineralogia ogólna*. Wyd. Geol., Warszawa.
- Brocardo G., 1982: *Minerals and gemstones, an identification guide*. New York.
- Bruton E., 1978: *Diamonds*. N.A.G., London.
- Bunn C., 1970: *Kryształy*. PWN, Warszawa.
- Cavenago-Bignami Moneta S., 1980: *Gemmologia*. Milano.
- CIBJO: *Pierres précieuses et fines, perles, définitions, dispositions, d'application*. Berno.
- Church A. H., 1883: *Precious stones*. London.
- Copeland L. L., 1960: *The diamond dictionary*. Los Angeles.
- Davies G., 1984: *Diamond*. A Hilger Ltd., Bristol.
- Doelter C. A., 1893: *Edelsteinkunde*. Leipzig.
- Duroc-Danner J. M., 1996: *Cours de gemmologie* (manuskrypt). Genève.
- Dutens L., 1783: *Des pierres précieuses et des pierres fines*. Florence.
- Elwell D., 1979: *Man-made gemstones*. Horwood, New York.
- Eppler W. F., 1973: *Praktische Gemmologie*. Stuttgart.
- Farn A. E., 1986: *Pearls: natural, cultured and imitation*. Butterworths, London.
- Fischer K., 1985-1986: *Edelsteinbearbeitung*. Stuttgart.
- Fritsch E., Rossman G. R., 1990-1991: *L'origine de la couleur dans les gemmes*. Aquegem Bulletin, Ottawa.
- Fontana M., 1995: *Guide des pierre précieuses*. Edition de Vecchi, Paris.
- Fraquet H. R., 1987: *Amber*. Butterworths, London.
- Gaal A. P., 1977: *The diamond dictionary*. Gem. Inst. of America, Santa Monica.
- Girault J., 1980: *Caractères optiques des minéraux transparents*. Edition Masson, Paris.

- Gleason S., 1966: *Ultra-violet guide to minerals*. Van Nostrand, New York.
- Gübelin E. J., 1983: *Internal world of gemstones*. ABC Edition, Zurich.
- Gübelin E. J., Koivula J. I., 1986: *Photoatlas of inclusions*. ABC Edition, Zurich.
- Gunia P., 1996: *Gemmologia praktyczna dla geologów*. Wyd. Uniw. Wrocławskiego, Wrocław.
- Günther B., 1991: *Supplement to the tables of gemstone identification*. E. Lenzen Verlag, Kirschweiler.
- Günther B., 1988: *Tables of gemstone identification*. E. Lenzen Verlag, Kirschweiler.
- Hall C., 1995: *Les pierres précieuses*. Bordas, Paris.
- Haüy J. R., 1817: *Traité de caractères physiques des pierres précieuses*, Paris.
- Hecht E., Zajac A., 1974: *Optics*. Addison-Wesley, Reading.
- Heflik W., 1989: *Kamienie ozdobne Polski*. Wyd. Geol., Warszawa.
- Heflik W., Natkaniec-Nowak L., 1996: *Gemmologia*. Antykwa, Kraków.
- Huddleston R. V., 1991: *Diamond*. Butterworths, London.
- Hughes R. W., 1990: *Corundum*. Butterworths, London.
- Hurlbut C. S., Switzer G. S., 1977: *Gemology*. Wiley Interscience Publ., New York.
- Institut de Bijouterie de Soumur, 1994: *Gemmologie* (manuskrypt). Saumur.
- Kamiński A. A., 1981: *Laser crystals, their physics and properties*. Springer, Berlin.
- Krzemińska E., Krzemiński W., 1992: *Les fantomes de l'ambre*. Musée d'histoire naturelle de Neuchatel, Suisse.
- Kerr P. F., 1955: *Optical mineralogy*. New York.
- King C. W., 1870: *The natural history of precious stones*. London.
- Kluge K. K., 1860: *Handbuch der Edelsteinkunde*. Leipzig.
- Lagercrantz O., 1913: *Papyrus Graecus Holmiensis (P. Holm)*. Uppsala.
- Lasnier B., 1993: *Les traitements des gemmes*. Revue de gemmologie, Paris.
- Lenzen G., 1983: *Diamonds and diamond grading*. Butterworths, London.
- Liddicoat R. T., 1981: *Handbook of gem identification*. GIA. Santa Monica.
- Łapot W., 1995: *Krystalooptyka*. Wyd. Uniw. Śląskiego, Katowice.
- Marfunin A. S., 1979: *Spectroscopy, luminescence and radiation centers in minerals*. Springer, Berlin.
- Maślankiewicz K., 1982: *Kamienie szlachetne*. Wyd. Geol., Warszawa.
- Muller H., 1987: *Jet*. Butterworths, London.
- Nassau K., 1983: *The physics and chemistry of color; the fifteen causes of color*. Wiley Interscience Publ., New York.
- Nassau K., 1980: *Gems made by man*. Chilton, Radnor.
- Nassau K., 1984: *Gemstone enhancement*. Butterworths, London.
- Nichols T., 1652: *A lapidary opr. the history of precious stones*. Cambridge.
- O'Donoghue M., 1987: *Quartz*. Butterworths, London.
- O'Donoghue M., 1988: *Gemstones*. Chapman and Hall, London.
- Orlov Y., 1977: *The mineralogy of the diamond*. Wiley Interscience Publ., New York.
- Payette F., 1994: *La gemmologie*. Fischer Presses, Ottawa.
- Penkala T., 1977: *Zarys krystalografii*. PWN, Warszawa.
- Plinius Gaius Secundus, 1845: *Historiae naturalis, Libri XXXVII* (tłum. J. Łukaszewicza). Poznań.
- Płaszyńska M., 1988: *Kamienie szlachetne - nie niszczące metody badania*. PWN, Kraków.
- Poirot J. P., 1984: *Elements de gemmologie* (manuskrypt). Paris.
- Ramdohr P., Strunz H., 1978: *Lehrbuch der Mineralogie*. Klockmans, Stuttgart.
- Read P. G., 1992: *Dictionary of gemmology*. Butterworths, London.
- Read P. G., 1991: *Gemmology*. Butterworths, London.
- Read P. G., 1983: *Gemmological instruments*. Butterworths, London.
- Roberts W. L., Rapp G. R., Weber J., 1974: *Encyclopedia of minerals*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Rothschild M. D. A., 1981: *Handbook of precious stones*. New York.
- Rouse J. D., 1986: *Garnet*. Butterworths, London.

- Ruxer M. S., Kubczak J., 1972: *Naszyjnik grecki w okresach hellenistycznym i rzymskim*. PWN, Poznań.
- Sachanbiński M., 1979: Kamienie szlachetne i ozdobne Śląska. Ossolineum, Wrocław.
- Schlee D., Glöckner W., 1978: *Bernstein*. Stuttgart.
- Sinkankas J., Read P. G., 1986: *Beryl*. Butterworths, London.
- Sinkankas J., 1985: *Gem cutting*. Van Nostrand, New York.
- Sinkankas J., 1972: *Gemstone and mineral data book*. Geoscience Press, Prescott.
- Schuman W., 1976: *Guide des pierres précieuses, pierres fines et pierres ornementales*. Delachaux et Niestlé, Lausanne.
- Smith G. F. H., 1972: *Gemstones*. Chapman and Hol., London.
- Sobczak N., Lubaszka K., 1990: *Szlify kamieni szlachetnych*. Normalizacja 5. PKNMiJ, Warszawa.
- Tavernier J. B., 1672: *Voyage en Turquie, en Perse et aux Indes*. Paris.
- Teofrast, 1963: *Pisma filozoficzne i wybrane pisma przyrodnicze*. Przekład i oprac. D. Gromska i J. Schnayder. Biblioteka Klasyków Filozofii. PWN, Warszawa.
- Urbaniak R., 1980: *Nazewnictwo kamieni jubilerskich*. Wyd. P.H.U. „Jubiler”, Warszawa.
- Wastiaux G., 1994: *La microscopie optique moderne*. Lavoisier, Paris.
- Watermeyer B., 1980: *Diamond cutting*. Purnell, Cape Town.
- Webster R., 1985: *The gemmologist's compendium*. N.A.G. Press, London.
- Webster R., 1983: *Gems: their sources, descriptions and identification*. Butterworths, London.
- Webster R., 1976: *Practical gemmology*. N.A.G., London.
- Wood E. A., 1967: *Kryształy i światło*. Poznań.
- Wright W. D., 1969: *The measurement of colour*. A. Hilger, London.
- Wyszecki G., Stiles W., 1982: *Color science-concepts and methods, quantitative data and formulae*. Wiley Interscience Publ., New York.
- Zapatero L., Garzon J., Sarmiento L., Guinea I. G., 1985: *Tratado de gemologia*. Inst. Gem. Espanol., Madrid.
- Znawca kamieni szlachetnych i wyrobów jubilerskich*. 1984: Praca zbiorowa. ZZDZ, Warszawa.
- Yaverbaum L. H., 1990: *Synthetic gems-production techniques*. Noyes Data Corporation, Park Ridge.

Appendix

Towarzystwa i instytuty gemmologiczne

Asociacion Espanola de Gemologia

Paseo de Garcia, 64, Barcelona-7, Hiszpania

Association Française de Gemmologie,

48 rue du Faubourg Montmartre,

75009 Paris, Francja

(*Revue de gemmologie A.F.G.*)

Association Jean-Pierre Chenet,

Centre de Recherches Gemmologiques,

Université de Nantes,

2, rue de la Houssinière, 44072 Nantes, Francja

(*Diplôme d'Université de Gemmologie — D.U.G.*)

Canadian Gemmological Association

Box 1106, Station Q, Toronto,

Ontario M4T 2PZ, Kanada

Deutsche Gemmologische Gesellschaft,

Postfach 2260, D-6580, Idar-Oberstein 2,

Niemcy

Erste Österreichische Gemmologische Gesellschaft

Graben 12, 1010 Vienna, Austria

Gemmological Institute of America

P.P. Box 2110, Santa Monica, CA 90406,

Stany Zjednoczone

(*Gems and Gemology*)

Gemmological Association of Australia

(Victoria Branch)

GPO Box 5133 AA, Melbourne 5001, Victoria,
Australia

Gemmological Association of Great Britain

Saint Dunstan's House, Carey Lane, London,
EC2V 8AB, Wielka Brytania

(*Journal of Gemmology*)

Gemmological Association of Hong Kong

University of Hong Kong,

Department of Physics, Hong Kong

Gemmological Association of All Japan,

Tokyo Bihokaikan, 1—24 Akashi-cho,

Chuo-ku, Tokyo, Japonia

Gemmological Association of Switzerland

Multergasse 20, CH-9000, St. Gallen,

Szwajcaria

Gemmologist's Association of Sri Lanka

63 Bristol Buildings, York Street, Colombo 1,
Sri Lanka (Cejlon)

Gemmological Institute of India

29/30 Gurukul Chambers,

187/9 Mumbaderi Road, Bombay 1, Indie

Instituto Gemologico Espanol,
Victor Hugo, 1, 3, Madrid-4, Hiszpania

Instituto-Gemmologico Italiano,
20146 Milano, Piazzale Gambara 7/8, Włochy

Institut National de Gemmologie,
48 rue du Faubourg Montmartre,
75009 Paris, Francja

**Laboratoire du Service Public du Contrôle
des Diamants, Perles fines et Pierres précieuses,**
2, place de la Bourse,
75002 Paris, Francja

Laboratoire Européen de Gemmologie,
9 rue Buffat, 75009 Paris, Francja

Norwegian Gemmological Association,
Dronningsgatan 27, Oslo, Norwegia

Polskie Towarzystwo Gemmologiczne
ul. Cybulskiego 30, 50-205 Wrocław, Polska

Société Belge de Gemmologie
Rue du Midi 118, Brussels 1000, Belgia

Smithsonian Institution
(National Museum of Natural History),
Washington, DC 20560, Stany Zjednoczone

LA GEMMOLOGIE GÉNÉRALE

Résumé

Le manuel préparé présent les informations fondamentales pour la gemmologie.

La première partie présente des notions de gemmologie générale. De ce chapitre on peut apprendre ce que la gemmologie et les gemmes; on peut aussi s'informer ce que les gemmes naturelles, synthétiques, traitées et les imitations.

Le gemmologue n'a pas vraiment à connaître toutes les lois qui expliquent la formation et la composition des gemmes, mais il lui sera utile de connaître des notions de base de la cristallographie parce que les objets qui intéressent le gemmologue sont le plus fréquemment des solides cristallins ou cristaux. Le cristal caractérise une structure atomique symétrique et ordonnée, une forme géométrique limitée par des faces planes et enfin des propriétés physiques qui varient selon la direction. Il y a une correspondance entre la symétrie interne et la symétrie externe du cristal. Même un fragment de cristal, si minuscule soit-il, et sans forme apparente, contient en lui tous les caractères d'un cristal. C'est d'une grande aide pour la détermination. Alors les informations de base de la cristallographie sont présentes au deuxième chapitre.

Les caractères extérieurs des gemmes frappent d'emblée nos sens. Ils sont fort minutieusement étudiés car, bien sûr, la gemmologie était, pendant très longtemps, presque uniquement descriptive. Si les caractères mettant nos sens à contribution peuvent maintenant être chiffrés au moyen de mesures faites au laboratoire, il n'en reste pas moins que ces caractères organoleptiques restent les seuls dont puisse s'aider le gemmologue sur le terrain pour identifier rapidement les espèces minérales. Alors il prend en considération: la forme géométrique d'un objet limitée par des faces planes, le clivage, la cassure, la dureté et le poids spécifique.

Les progrès rapides des sciences exactes se répercutent en gemmologie. Or de très grands progrès ont été réalisés depuis ces dernières décades et actuellement les gemmologues possèdent une large gamme de moyens d'étude. Ce sont les appareils qui, il y a peu d'années encore, étaient réservés au domaine des seuls physiciens. Mais les gemmologues doivent commencer par une bonne étude des méthodes d'identification de gemmologie fondamentale. Il est donc nécessaire de faire le point sur les techniques qui permettent de faire une étude fondamentale complète des propriétés des gemmes. L'aspect de la couleur d'une gemme est ce qui frappe en tout premier lieu. Les couleurs existent grâce à la lumière, c'est-à-dire à des oscillations électromagnétiques d'une certaine longueur d'onde. On a trois types de sensation de la couleur et la perception de la couleur se définit selon: *la tonalité, la saturation ou la pureté et la luminosité*. Trois facteurs sont importants pour déterminer la couleur d'une gemme: *les conditions d'observation, la gemme elle-même et l'oeil humain*. Les propriétés optiques occupent une place dominante parmi toutes celles que possèdent les gemmes. En effet, c'est d'elles que dépendent la couleur, l'éclat, le feu, la luminosité, les effets de lumière, etc. des gemmes. Alors c'est pourquoi le troisième chapitre présente les propriétés des gemmes et les méthodes fondamentales d'identification des gemmes.

Les gemmes ne présentant aucune particularité d'interne facile à reconnaître sont dites „pures”. La plupart des cristaux ne se présentent pas sous un aspect aussi régulier; l'irrégularité se manifeste bien souvent, du fait que certains cristaux se sont développés aux dépens des autres et ont pour origine une croissance irrégulière causée par des solutions cristallines en voie de transformation. Les irrégularités d'un cristal passaient pour des défauts. Les perturbations dans la structure cristalline sont classées parmi: *les inclusions, les zones d'accroissement et les macles*. Alors c'est pourquoi le quatrième chapitre présente les caractères internes des gemmes.

Les premières synthèses significatives des minéraux ont réellement commencé vers la fin du XIX^e siècle. Depuis cette époque la cristallogénèse a réalisé d'importants progrès. Les gemmes synthétiques sont des produits dont la fabrication, provoquée totalement ou partiellement par l'homme, a été obtenue par divers procédés. Leurs propriétés physiques et chimiques correspondent à celles des gemmes naturelles qu'elles copient. Ces procédés permettent de faire cristalliser des espèces non

recencées dans la nature. Pour les gemmologues le plus intéressant sont les produits dont la fabrication a été obtenu par: *la synthèse Verneuil, la synthèse Czochralski, la synthèse „flux-fusion”, la synthèse hydrothermale, la synthèse en auto-creuset, la synthèse par hautes pressions et températures.* C'est pourquoi le cinquième chapitre présente les matériaux de synthèse, les méthodes de croissance cristalline et les fabricants des matériaux de synthèse.

Il existe différents procédés, certains très anciens, pour changer ou améliorer les qualités esthétiques et commerciales de gemmes peu attrayantes. Sur une gemme, il consiste soit à améliorer l'apparence, soit à modifier la couleur, soit à diminuer les imperfections, soit à produire une ressemblance avec une autre gemme. Bien que certains traitements élémentaires aient été connus dès l'Antiquité, le fantastique bond en avant effectué dans la compréhension de la physique et de la chimie des solides au cours des dernières années a conduit à de nouvelles techniques de traitement de plus en plus sophistiquées. Ayant connaissance des détails des différentes techniques de traitement, le gemmologue peut reconnaître plus facilement celle qui a été pratiquée. Alors c'est pourquoi le sixième chapitre présente les traitements passifs et les traitements actifs.

Le façonnage des gemmes est un travail délicat, pratiqué par des spécialistes qui portent le nom de diamantaires pour le diamant et de lapidaires pour toutes les autres gemmes. Il existe une infinité de tailles pour les gemmes. Le gemmologue doit connaître les types de taille courant et les méthodes d'évaluation des gemmes. Alors les informations de base des tailles des pierres précieuses sont présentées au septième chapitre.

Il existe une foule de possibilités différentes dans la fabrication des pierres composées. Il s'agit avant tout de truquages dont le but, le plus souvent recherché est de faire illusion. La gemmologue doit connaître les catégories des gemmes assemblées et les méthodes de détermination des pierres composées. C'est pourquoi le huitième chapitre présente: doublets, triplets et multiplots.

S'il veut se maintenir au meilleur niveau, doit suivre l'évolution des techniques de travail avec des gemmes de plus en plus sophistiquées. Donc la détermination de la nature d'une gemme, la détection de l'existence de traitements, la recherche du ou des types de traitements subis par une gemme, la reconnaissance de pierres synthétiques de qualité quasi parfaite rendent obligatoire le laboratoire gemmologique. Alors, en neuvième chapitre est présentée la laboratoire gemmologique: *de la classe fondamentale* qui permet de reconnaître les gemmes, de détecter certains traitements courants et de suspecter d'autres traitements plus élaborés sur l'existence de petites anomalies, *de la classe plus équipées* qu'elle est habituellement préparée pour certains examens réclament une spécialisation, *de la classe ultraspécialisés*, pouvant pratiquer tous les types d'examen jusqu'aux plus performants. Le gemmologue, pour systématiser tous les renseignements relatifs à une gemme doit avoir la fiche de travail (la fiche d'identification). Le développement de la science a rendu possible mettre en pratique les banques de données gemmologiques sur la disquette; on s'installe simplement sur tout P.C. (personnel computer) sous Windows. Le laboratoire portable est très utile pour l'expert pendant le voyage. Il s'agit de laboratoires de débrouillage qui permettent de reconnaître les gemmes dans un grand nombre de cas et de détecter certaines anomalies pour envoyer la gemme suspecte dans des unités plus équipées.

Les adeptes de gemmologie peuvent approfondir des problèmes gemmologiques se servant des livres présentés dans la bibliographie (le dixième chapitre).

Pour les gemmologues sont très utiles les associations et les instituts gemmologiques. Leurs adresses sont présentées en annexe.

Redaktor
Grażyna Wojdała

Redaktor techniczny
Lech Dobrzański

Copyright © 1999
by Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego
Wszelkie prawa zastrzeżone

ISSN 0239-6432
ISBN 83-226-0891-8

Wydawca
Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego
ul. Bankowa 12B, 40-007 Katowice

Wydanie I. Nakład: 500 + 50 egz. Ark. wyd. 27,0
Ark. druk. 18,0 + 5 wklejek.

Oddano do składu w listopadzie 1998 r.

Podpisano do druku w lutym 1999 r.

Papier offset. kl. III, 80 g. 70 × 100.

Zam. 1547-k

Cena 20 zł

Cieszyńska Drukarnia Wydawnicza

24. 552

nr inw.: BG - 287615



BG 287615

Do korekty
w Cytel

ISSN 0239-6432
ISBN 83-226-0891-8